



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO – UFERSA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS DE
COMUNICAÇÃO E AUTOMAÇÃO – PPGSCA

**Antena Discreta com Patch Circular Confeccionada
Sobre Substrato Dielétrico Cerâmico à Base de
Pentóxido de Nióbio – Nb₂O₅**

Jorge Henrique de Almeida Silveira

Mossoró – RN

2015

Jorge Henrique de Almeida Silveira

**Antena Discreta com Patch Circular Confeccionada
Sobre Substrato Dielétrico Cerâmico à Base de
Pentóxido de Nióbio – Nb₂O₅**

Orientador: Prof. Dr. Idalmir de Souza Queiroz Júnior

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Comunicação e Automação – PPGSCA da Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA, como requisito parcial à obtenção do título de *Mestre em Sistemas de Comunicação e Automação*.

Mossoró – RN

2015

Catálogo na Fonte

Catálogo de Publicação na Fonte. UFRSA - BIBLIOTECA CENTRAL ORLANDO TEIXEIRA - CAMPUS MOSSORÓ

Silveira, Jorge Henrique de Almeida.

Antena discreta com patch circular confeccionada sobre substrato dielétrico cerâmico à base de pentóxido de nióbio - Nb₂O₅ / Jorge Henrique de Almeida Silveira. - Mossoró, 2015.

84f. il.

1. Antenas. 2. Pentóxido de nióbio. 3. Sistemas de comunicação sem fio. I. Título

RN/UFRSA/BCOT/384
S587a

CDD 621384135

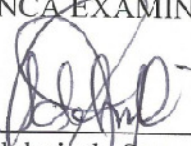
JORGE HENRIQUE DE ALMEIDA SILVEIRA

**ANTENA DISCRETA COM PATCH CIRCULAR
CONFECCIONADA SOBRE SUBSTRATO DIELÉTRICO
CERÂMICO À BASE DE PENTÓXIDO DE NIÓBIO –
 Nb_2O_5**

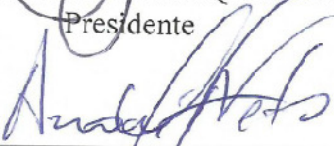
Dissertação de mestrado acadêmico
apresentada ao Programa de Pós-Graduação
em Sistemas de Comunicação e Automação,
como requisito para a obtenção do título de
Mestre em Sistemas de Comunicação e
Automação.

APROVADA EM: 27/02/2015.

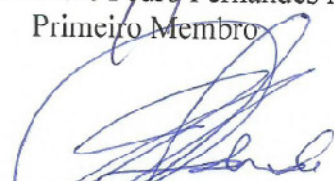
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Idalmir de Souza Queiroz Júnior
Presidente



Prof. Dr. André Pedro Fernandes Neto
Primeiro Membro



Prof. Dr. Humberto Dionísio de Andrade
Segundo Membro



Prof. Dr. Marinaldo Pinheiro de Sousa Neto
Membro Externo (IFRN)

Mossoró, 27 de fevereiro de 2015

“Toda ciência é um gênero da
ignorância”.

Thomas de Kenpis

Dedicatória

Dedico o presente feito a Santíssima Virgem Maria, Mãe Singular por ser mãe de Deus e também por ser mãe de todos nós, já que, no dizer de Pe Antônio Vieira,

“Não está a singularidade em ser só, nem a grandeza em ser grande; entre muitos ser o só, e entre grandes ser o grande, esta é a singularidade. O mesmo digo dos filhos de Maria (...) Filhos com os demais, mas não filhos como os demais, com especial eleição, com especial amor, com especial nome, com especial prerrogativa, enfim, com especial filiação, como entre os demais filhos, eles os filhos”.

**Pe. Antônio Vieira, Sermão de
Nossa Senhora do Carmo**

Agradecimentos

- Rendo graças a Deus Uno em essência e Trino em pessoas que segundo a sua benevolência e vontade, permitiu a realização do presente feito.
- A Santíssima Virgem Maria, Mãe de Deus e minha Rainha e Senhora, de quem tudo recebo em graças e para quem tudo vo-la dou em oferenda ao Senhor.
- Ao Padre Walter Colline pelas orientações e direção espirituais, sobretudo, nos momentos de desfalecimento e desânimo da alma espiritual.
- Aos meus pais, Francisco Olivar Silveira e Maria Lúcia Martins de Almeida Silveira por toda orientação educacional e moral até aqui concedidas. Pelo apoio em mais essa etapa de minha formação intelectual.
- A minha esposa Lidiana de Medeiros Fernandes Silveira pelo incentivo, orações, compreensão e apoio nas horas mais difíceis.
- Aos meus filhos Miguel Henrique e Viviane Maria por quem e para quem dedico todo o meu esforço. Agradeço a compreensão face à minha ausência.
- As minhas irmãs Luciana Almeida e Roseana Almeida pelas orações e apoio desprendidos.
- Ao meu cunhado Carlos Augusto Nogueira Mendes pelo incentivo.
- Aos meus irmãos da associação Comunidade Católica Shekiá pelas orações.
- Aos professores que fazem o programa de pós-graduação em Sistemas de Comunicação e Automação-PPGSCA da UFERSA.
- Especial agradecimento ao Prof. Dr. Idalmir Queiroz de Souza Júnior pelas orientações compreensão e paciência, no que pertine a elaboração desse trabalho intelectual.
- Aos amigos: Manoel, Adler, Adelson, Tarcísio pelos incontáveis auxílios prestados durante todo o período do curso de pós-graduação.
- À Livia pelo seu trabalho responsável e prestativo sempre disponível para ajudar.
- A Companhia Brasileira de Mineração e Mineralogia – CBMM pela concessão do pó de pentóxido de nióbio para a confecção do substrato dielétrico.
- Especial agradecimento à Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Norte (FAPERN), a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), ao INCT (CSF) da UFRN, sobretudo, ao Prof. Dr. Humberto César Chaves Fernandes pelo auxílio nas simulações realizadas, e ao Prof. Dr. Ronaldo de Andrade Martins pela assistência e permissão em utilizar os recursos do laboratório de telecomunicações da UFRN, sem o qual as medidas não poderiam ser realizadas.

Resumo

As antenas de microfita são as antenas mais versáteis e usadas em microondas, sendo constituídas por um plano metálico e um elemento radiador separados por um material dielétrico, chamado de substrato, na literatura técnica. O trabalho presente apresenta como objetivo principal o de construir uma antena de microfita com *patch* no formato circular, usando como material para confecção do substrato dielétrico o Pentóxido de Nióbio (Nb_2O_5). Assim, produziu-se um substrato dielétrico a base deste material valendo-se para tanto do método da metalurgia do pó, o qual compreende três fases, a saber: moagem, compressão ou compactação e sinterização. O substrato produzido foi caracterizado eletricamente e apresentou uma baixa permissividade e baixa tangente de perdas, para uma faixa de frequência em microondas de 8,2GHz a 12,4GHz. A antena de microfita fabricada com este substrato foi projetada, segundo o método da cavidade, para ressoar em uma frequência em torno de 10 GHz. Os resultados numéricos obtidos nas simulações, e medições realizadas com a antena confeccionada mostraram-se satisfatórios e com boa concordância.

Palavras Chaves – Antenas de microfita, Pentóxido de nióbio, Sistemas de comunicação sem fio.

Abstract

The microstrip antennas are the most versatile and used in microwave antennas, is constituted by a metal element and a radiator plane separated by a dielectric material, called substrate in the technical literature. This work has as main goal to build a microstrip antenna with Patch in circular format, using as material for making the dielectric substrate Niobium pentoxide (Nb_2O_5). Thus, there has been a dielectric base substrate making use of this material for both the powder metallurgy method, which comprises three stages namely milling, compression or compaction and sintering. The substrate produced was characterized electrically and showed a low permittivity and low loss tangent for a frequency range in 8,2GHz microwave to 12,4GHz. The microstrip antenna made from this substrate is designed to resonate at a frequency around 10 GHz by the cavity method. The numerical results obtained in the simulations, and measurements made with the antenna were satisfactory and with good agreement.

Key Words – Microstrip antennas, niobium pentoxide, wireless communication systems.

Sumário

1. Introdução	01
1.1 Estado da Arte.....	04
1.2 Motivação.....	06
1.3 Objetivos.....	07
1.3.1 Geral	07
1.3.2 Específicos	07
1.4 Organização do texto.....	08
 2 Referencial Teórico	10
2.1 Escorço Histórico.....	10
2.2 Definição de Antena.....	10
2.3 Antenas de Microfita.....	11
2.3.1 Características Essenciais das Antenas de Microfita.....	16
2.3.2 Permissividade Elétrica do Substrato (ϵ).....	19
2.3.3 Efeito da Espessura do Substrato.....	20
2.4 Formas de Alimentação das Antenas de Microfita.....	22
2.4.1 Alimentação através da Linha de Microfita.....	23
2.4.2 Alimentação através de Cabo Coaxial.....	24
2.4.3 Alimentação por acoplamento de abertura.....	26
2.5 Métodos de Análise das antenas de Microfita.....	27
2.5.1 Método da Cavidade.....	28
2.5.2 Simulação Numérica.....	30
2.6 Determinação dos Campos Elétricos e Magnéticos – Modo TM_{mnp}^z	32
2.7 Frequência de Ressonância.....	33
2.8 Diretividade e Condutância.....	36
2.9 Largura de Banda, Fator de Qualidade e Eficiência	38
2.10 Impedância de Entrada.....	40
2.11 Polarização.....	40

3	Antenas <i>Patch</i> de Microfita desenvolvida sobre Substrato a base de Pentóxido de Nióbio – Nb₂O₅.....	44
3.1	Pentóxido de Nióbio – Nb ₂ O ₅	47
3.2	Fases da Confecção do Substrato Cerâmico e da Antena de Microfita...	51
4	Antenas <i>Patch</i> de Microfita desenvolvida sobre substrato a base de Pentóxido de Nióbio, simulações, medições e resultados	57
4.1	Simulações.....	57
4.2	Medições.....	61
5	Análise Conclusiva.....	66
6	Referências	68

Lista de Figuras

1.1: Geometria de uma Antena de Microfita retangular	04
2.1: Geometria da Antena Planar do tipo <i>patch</i> na forma retangular.....	17
2.2: Antenas de Microfita – Formatos de <i>patch</i>	18
2.3: Padrões de radiação E-plano de um patch circular com diferentes permissividades substrato.....	19
2.4: H-plano e polarização cruzada padrões de Figura 4.....	19
2.5: Padrões de radiação E-plano de um patch circular com diferentes alturas de substrato.....	20
2.6: H-plane e padrões de polarização cruzada da Figura 6.....	21
2.7: Alimentação por: (a) linha de microfita; (b) cabo coaxial; (c) acoplamento eletromagnético; (d) abertura e (e) guia de onda coplanar	22
2.8: Circuitos equivalentes para alimentadores.....	23
2.9: Alimentação através de linha de Microfita.....	24
2.10: Antena planar com alimentação com uma linha de 50 W (L_{50}, W_{50}) e uma adaptação de 1/4 de comprimento de onda (L_{qw}, W_{qw})	24
2.11: Antena de microfita alimentada por linha coaxial	25
2.12: Antena de Plaqueta de microfita retangular com alimentação coaxial.....	25
2.13: Alimentação de antenas <i>patch</i> por linha coaxial	25
2.14: Alimentação por acoplamento	26
2.15: Geometria de uma antena de plaqueta circular de microfita.....	30
2.16: <i>Patch</i> circular – alimentação por sonda coaxial.....	42
3.1: Fluxograma de Etapas de confecção do substrato cerâmico	45
3.2: Pegmatito composto de feldspato alterado e cristais azuis de corindo	48

3.3: Moinhos de bolas descontínuo	51
3.4: Moinho de bolas.....	52
3.5: Matriz em aço ferramenta e Prensa de compactação.....	52
3.6: Forno de mufla fabricado pela Jung.....	53
3.7: Analisador de Redes Vetorial da Rohde Schwartz, modelo ZVB14 caracterizando o substrato a base de Pentóxido de Nióbio – Nb_2O_5 . Medições da Permissividade Elétrica (ϵ_r) e da tangente de perdas ($\text{Tan}\delta$).....	54
3.8: Antena de Microfita com <i>Patch</i> na forma circular disposta sobre o substrato dielétrico a base de Pentóxido de Nióbio – Nb_2O_5	55
4.1: Antena de Microfita Circular projetada.....	58
4.2: Gráfico do ganho da antena simulada em razão da frequência de operação.....	58
4.3: Diagrama de radiação em 2D da antena simulada.....	59
4.4: Diagrama de radiação em 3D da antena simulada.....	60
4.5: Densidades de correntes e campos radiados da antena simulada.....	60
4.6: Analisador de Redes Vetorial da Rohde Schwartz, modelo ZVB14 medindo as propriedades da antena produzida.....	61
4.7: Medidas realizadas no Analisador de Redes Vetorial da Rohde Schwartz, (a) Perda de Retorno e (b) Carta de Smith.....	63
4.8: Curva de perda de retorno simulada e mensurada.....	64

Lista de Símbolos

ϵ	permissividade elétrica
ϵ_r	permissividade elétrica relativa
μ	permeabilidade magnética
μ_r	permeabilidade magnética relativa
σ	condutividade elétrica
λ	comprimento de onda
ω	frequência angular
θ	ângulo de incidência do feixe de raios - X com o plano cristalográfico
δ	ângulo da tangente de perdas
$f \tau$	coeficiente de temperatura na frequência de ressonância
I	corrente elétrica
V	potencial elétrico (tensão ou voltagem elétrica)
R	resistência
X	reatância
C	capacitância
L	indutância
$VSWR$	coeficiente de onda estacionária de tensão
f	frequência
f_r	frequência de ressonância
BW	largura de banda
$BW(\%)$	largura de banda percentual

Q	fator de qualidade
v	velocidade
c	velocidade da luz
T	temperatura
g	aceleração da gravidade
D	diâmetro
A	área
W	largura do <i>patch</i>
L	comprimento do <i>patch</i>
h	espessura (altura) do substrato dielétrico

Lista de Abreviaturas

LTCC	<i>Low Temperature Co-Fired Ceramics</i>
RF	<i>Radio Frequency</i>
UHF	<i>Ultra High Frequency</i>
MMIC	<i>Microwave Monolithic Integrated Circuit</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
RFID	<i>Radio-Frequency Identification</i>
CPW	<i>Coplanar Wave Guide</i>
RL	<i>Return Loss</i>
TLM	<i>Transmission Line Model</i>
RCM	<i>Resonant Cavity Model</i>
MNM	<i>Multiport Network Model</i>
ECM	<i>Equivalent Circuit Model</i>
MoM	<i>Method of Moments</i>
FEM	<i>Finite Element Method</i>
FDTD	<i>Finite-Difference Time-Domain Method</i>
FDFD	<i>Finite-Difference Frequency-Domain Method</i>
HFSS®	<i>High Frequency Structure Simulator</i>
XRD X	<i>Ray Diffraction</i>

1. Introdução

O homem experimenta a era da comunicação interativa, onde os veículos de comunicação e empresas necessitam cada vez mais da interação direta com seus clientes. O mesmo ocorre entre as pessoas, tornando-as cada vez mais próximas, independente da distância física entre as mesmas. O número de celulares supera o de pessoas no mundo, e todos estes celulares se comunicando entre si, acessando a internet, se conectando a computadores móveis, e até aos eletrodomésticos. Todas as tecnologias, principalmente as mais atuais como as wireless, e entre elas o Bluetooth e o WiMax, exigem antenas, cada uma com suas características próprias, porém com exigências cada vez maiores, como redução de tamanho, aumento de eficiência, diminuição de custos e aumento de largura de banda.

Uma das mais recentes tecnologias atualmente utilizada é a Bluetooth, que é um sistema de comunicação e interconexão wireless de curto alcance, que permite com que dispositivos eletrônicos se conectem e se comuniquem sem a utilização de cabos. É um padrão tecnológico mundial adotado pelas principais empresas da área de telecomunicações e informática. Esta tecnologia propõe a conectividade num sentido mais amplo, envolvendo todos os equipamentos eletrônicos de uma mesma área, principalmente os equipamentos móveis. Esta tecnologia opera na faixa de frequência de 2.45 GHz, ou seja, microondas, esta frequência está na banda ISM (Industrial, Scientific and Medical), disponível mundialmente.

Outra tecnologia inovadora é a WiMax, que é um acrônimo para World Wide Interoperability for Microwave Access (Interoperabilidade Mundial para Acesso por Microondas). É uma tecnologia de banda larga wireless, que tem o objetivo de atuar como alternativa às tecnologias via cabo, pretendendo ter o alcance de até 50 Km e capacidade de banda passante de até 70 Mbps. Esta tecnologia foi desenvolvida por várias empresas encabeçadas pela Intel e Nokia, onde suas principais vantagens são banda larga, longo alcance e dispensa de visada direta, sendo desenvolvido para funcionar em redes metropolitanas (MAN). O WiMax opera em três diferentes frequências, a de 3,5 GHz, que exige licitação e suporta o padrão fixo; a de 2,5 GHz que também é licitada e suporta o padrão móvel, e a de 5,8 GHz, também utilizada pelo padrão fixo, porém não-licitada. As tecnologias citadas funcionam dentro da faixa de

microondas, onde a exigência de antenas mais robustas, eficientes e seguras é cada vez maior.

Para estas aplicações podemos usar as antenas de microfita, que são antenas versáteis usadas em microondas, sendo constituídas por um plano metálico e de um elemento irradiador separados por um material dielétrico, chamado na literatura técnica de substrato. Esta antena é uma tecnologia planar que atua na faixa de frequência de microondas, desde um pouco abaixo de 1 GHz até centenas de GHz. Há vários tipos de antenas de microfita, e entre suas principais características, destacam-se perfil fino, fabricação simples, polarização circular ou linear, possibilidade de operar em frequência dupla, pouco peso e volume, baixo custo, entre outros. Por ser um tipo de antena bastante usada em microondas, é de grande interesse tecnológico aumentar suas vantagens, para tanto, o uso de novos materiais tem a capacidade de melhorar suas características boas e reduzir seus pontos fracos, como largura de banda estreita, baixa capacidade de potência, alta taxa de perda, e pouca isolamento entre a fonte e os elementos de radiação, por exemplo.

Entre as características que se pode alterar com novos tipos de substratos estão as dimensões e a largura de banda. O uso de substratos com alta permissividade elétrica relativa pode proporcionar uma redução nas dimensões da antena, enquanto que baixas perdas dielétricas acarretam um aumento na largura de banda da antena. Também se pode assegurar uma melhor seletividade da frequência de ressonância para reduzir ruídos e interferências, para tanto é necessário ter um alto fator de qualidade, o que significa redução nas perdas dielétricas. A produção, estudo e análise de novos materiais aplicados a antenas de microfita são essenciais para estas melhorias. Justificando o presente trabalho.

O presente feito visa desenvolver antenas de microfita sobre substratos dielétricos para sistemas wireless. Pretende-se produzir substratos a base da matéria-prima Pentóxido de Níbio (Nb_2O_5) através de técnicas de moagem. Estes substratos serão dopados para obtenção de características e propriedades elétricas novas e controladas. Como resultado espera-se reduzir dimensões das antenas e controlar as propriedades elétricas, como permissividade elétrica relativa, condutividade elétrica do material, resistência mecânica e impedância de entrada da antena. Pretende-se construir estas antenas, caracterizá-las por meio de técnicas de microondas usando o analisador

de redes, assim como também, analisar o comportamento de campos eletromagnéticos no interior destas estruturas.

1.1. Estado da Arte

Nas últimas décadas, tem-se observado um grande interesse na utilização de estruturas planares nas comunicações sem fio, destacando-se as antenas de microfita. Este fato é devido, em parte, ao grande avanço nas técnicas de análise e de construção dessas estruturas. Diversos trabalhos abordando as propriedades desses dispositivos foram publicados nos últimos anos. (MISHRA et al. 2010; YAWER et al. 2010; PRASAD et al. 2011; CARNEIRO FILHO, 2010)

Como é por demais cediço, as antenas de microfita são constituídas de três elementos, a saber, o radiante – a parte metálica e condutora – então denominado de *patch* (plaqueta), o substrato que possui função dielétrica e o plano terra. Conforme se depreende da figura 1:

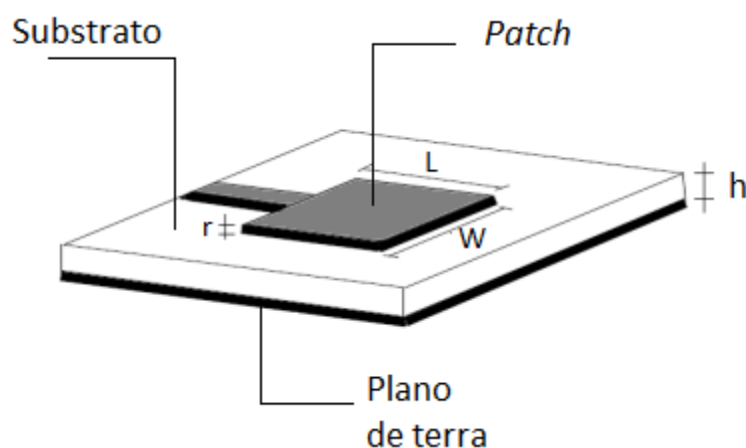


Figura 1 – Geometria de uma Antena de Microfita retangular

Fonte: (site <http://fie6b.wordpress.com>) – Adaptada

Devido à facilidade de análise e de fabricação, sem prescindir de suas atraentes características de radiação, especialmente baixa radiação de polarização cruzada, o presente trabalho pretende desenvolver antenas de microfita no formato circular valendo-se para tanto da constituição de substratos de Pentóxido de Nióbio (Nb_2O_5). Considerando tal intento, projetos similares foram encontrados, desenvolvendo antenas de microfita disposta em um substrato do tipo cerâmico. (MISHRA et al. 2010; YAWER et al. 2010; PRASAD et al. 2011; CARNEIRO FILHO, 2010)

A exemplo do que restou dito acima, Girão, em trabalho dissertativo, valeu-se de Caulim, Quartzo e Feldspato Sódico na elaboração de um suporte cerâmico, submetendo tal substrato a testes e análises para caracterizá-lo mineralogicamente,

mecanicamente, fisicamente e, sobretudo, eletricamente segundo a sua resistividade (ρ) e constante dielétrica (K) (GIRÃO, 2012).

Um outro trabalho consistiu na elaboração de substrato cerâmico $BiNbO_4$ para antenas de microfita de sistemas de comunicações sem fio desenvolvido por Carneiro Filho (2010). O referido autor projetou e elaborou substratos dielétricos cerâmicos de alta permissividade elétrica usando o niobato de bismuto ($BiNbO_4$) dopado com pentóxido de vanádio (V_2O_5). Os substratos foram utilizados na construção de antenas *patch* de microfita para operar na faixa de frequências de microondas, e, restritamente, em frequências na faixa compreendida entre 2,5 GHz e 3,0 GHz.

Em um artigo Alka buscou projetar uma antena de microfita com *Patch* circular, de modo a operacionalizá-la na banda X. Para tanto ela escolheu como frequência de operacionalização da antena 9,8GHz. Vários parâmetros da antena foram calculados, entre os tais, constante de propagação no espaço livre e no substrato, raio da plaqueta e raio efetivo, e, em sede de uma alimentação através de uma sonda coaxial, restou obtida, como impedância de entrada um valor de 50 Ω . Tanto o coeficiente de onda estacionária (VSWR) como a perda de retorno foram observados seguindo o padrão de radiação. Em suma, o presente artigo mostra a concepção de uma antena de microfita no formato circular, valendo-se para análise, do método da cavidade em banda X (ALKA, 2012).

Sob outro prisma, Verma e Nasimuddin (2002), valendo-se do método da cavidade melhorado, qual seja, o Modelo Wolff Modificado (MWM), em uma análise de uma antena de microfita, cujo o *Patch*, com formato circular e substrato de calibre grosso, buscou calcular a frequência de ressonância, a impedância de entrada e a largura de banda da referida antena variando a espessura do substrato entre $0.003\lambda_g$ - $0.11\lambda_g$. Os resultados provenientes do MWM mostraram melhor uniformidade e concordância com aqueles obtidos experimentalmente, bem como, quando comparado com resultados calculados com o uso de um software comercial cuja a modelagem de cálculo se dera pelo Método dos Momentos (MOM).

Desta feita, Verma e Nasimuddin utilizaram o MWM para calcular com precisão a frequência de ressonância da antena microfita circular sobre um substrato sem perdas, por considerarem que os métodos teóricos encontrados na literatura não serem precisos, vez que, o MWM fornece desvio em ressonância frequência dentro de 1,69% e desvio

na resistência ressonante dentro de 17% contra os resultados experimentais, para o intervalo de espessura do substrato retromencionado.

Noutro quadrante, buscando um melhoramento da largura de banda da antena de microfita cuja plaqueta com formador circular, Hussain et al (2010) constatando a desvantagem das antenas de microfita de possuírem uma largura de banda estreita da ordem de 2 a 5%, valeram-se de duas técnicas de melhoramento de tal parâmetro, dentre as quais estava a utilização de um substrato de espessura mais grossa.

Tomando por referência os trabalhos externados anteriormente, o presente labor dissertativo pretende construir uma antena de microfita com *Patch* circular utilizando como matéria prima para confecção do substrato o material Pentóxido de Níbio (Ni_2O_5). Uma vez que o elemento dielétrico foi produzido, buscar-se-á caracterizá-lo eletricamente externando seus parâmetros elétricos, entre eles, a permissividade elétrica (ϵ_r), tangente de perdas ($\tan \delta$). Por fim, utilizar-se-á o método de análise da cavidade para projetar a antena de microfita e posteriormente realizar uma simulação para obter a frequência de ressonância, impedância de entrada e largura de banda. De posse destes resultados será construída uma antena com o substrato de pentóxido de níbio para realizar as medidas em laboratório e caracterizar a antena.

1.2 Motivação

A redução das dimensões dos dispositivos de microondas é possível quando se utiliza substratos cerâmicos com elevada permissividade elétrica relativa na sua elaboração. Ainda assim, as baixas permissividades dielétricas contribuem para um alargamento da faixa de frequência na qual a antena venha a operar, onde a frequência de ressonância definida durante a fase de projeto, sendo que isto também depende da finalidade da antena. Os ressoadores dielétricos cerâmicos usados nas frequências de microondas possuem características peculiares das quais se passa a tratar doravante.

Um baixo valor da permissividade elétrica relativa, ϵ_r , resulta em uma maior dimensão de uma antena, que é diretamente proporcional ao comprimento de onda de operação no ressoador dielétrico, λ_D . O valor do comprimento de onda no ressoador dielétrico, que não exibe propriedades magnéticas (com permeabilidade magnética relativa aproximadamente igual a 1, $\mu_r \approx 1$), e proporcional ao valor do comprimento

de onda no espaço livre, λ_0 , multiplicado pelo inverso da raiz quadrada da permissividade elétrica relativa, ou seja: $\lambda_D = \lambda_0 / \sqrt{\epsilon_r}$. Logo, quanto menor a permissividade elétrica relativa maior o comprimento de onda de operação, consequentemente, maior a dimensão da antena, sendo que o inverso também se verifica.

Outra característica consiste no elevado fator de qualidade Q . Tal característica objetiva assegurar a seletividade da frequência de ressonância, contribuindo para uma redução de ruídos e interferências. Para tanto, necessário se faz obter para o fator de qualidade de um ressonador dielétrico um valor $Q > 1000$. O fator de qualidade de um ressonador dielétrico é o inverso de suas perdas dielétricas, caracterizada pela tangente de perdas, $\tan\delta$, ou seja: $Q = 1 / \tan\delta$. Logo, em um ressonador dielétrico com baixas perdas dielétricas deve-se ter um valor da tangente de perdas tal que $\tan\delta < 10^{-3}$.

Tendo em vista o baixo valor do coeficiente de variação da temperatura na frequência de ressonância, τ_F , a estabilidade térmica da frequência visa garantir a confiabilidade do componente, ainda quando sujeito as variações da temperatura de operação. Desta feita, um material que apresente baixo coeficiente de variação da temperatura na frequência de ressonância, proporciona a manutenção da eficiência da antena em previsão das mudanças na temperatura do meio ambiente. (CARNEIRO FILHO, 2010).

O material em estudo é muito versátil, e a maneira de produzir o substrato permite variar dimensões, realizar dopagens, usá-lo em altas temperaturas, tornando-o um bom material para o uso em substrato de antenas de microfita.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

O presente trabalho apresenta como objetivo geral o de projetar, simular, construir e medir uma antena de microfita com *Patch* no formato circular, usando como material para confecção do substrato dielétrico o *Pentóxido de Nióbio* (Ni_2O_5).

1.3.2 Específicos

Usar um substrato dielétrico a base de pentóxido de nióbio (Ni_2O_5), produzido pelo o método da metalurgia do pó, o qual compreende quatro fases a saber: moagem, compressão ou compactação e sinterização.

Medir a permissividade elétrica, bem como, a tangente de perdas, do substrato, dentro de uma faixa de frequência de 8,2GHz a 12,4GHz.

Projetar e simular a antena no formato circular procedendo com a metalização, a qual consiste na colagem do *Patch* e do plano de terra sobre o substrato.

Medir os parâmetros da antena como frequência de ressonância, impedância de entrada e largura de banda.

Analizar a possibilidade do substrato escolhido poder ser usado como dielétrico numa antena de microfitas.

1.4 Organização do Texto

O trabalho dissertativo está distribuído em quatro capítulos. O segundo capítulo trata do referencial teórico no qual se externa um esboço histórico sobre antenas, definição geral de antenas, definição de antena de microfita, características essenciais das antenas de microfita, composição das antenas de microfita, evidenciando os seus elementos, a saber: *Patch* (elemento de radiação), substrato (elemento dielétrico) e o plano de terra, definindo e descrevendo a função e as características funcionais de cada um; formas de alimentação das antenas de microfita enfatizando o modo de alimentação através de linha de microfita; métodos de análise matemática das antenas de microfita, dando ênfase ao método da cavidade, que será utilizado no presente trabalho e exposição dos principais parâmetros das antenas de microfita, no caso, tratados teoricamente, mas que serão objeto de apreciação quando por ocasião das medições e simulações de ordem prática, a saber: frequência de ressonância, impedância de entrada, largura de banda entre outros.

O terceiro capítulo trata precisamente do objeto deste trabalho, qual seja, a confecção de antenas *Patch* de Microfita desenvolvida sobre Substrato a base de Pentóxido de Níbio – Nb_2O_5 . Tal capítulo está assim subdividido: exposição das fases de elaboração do substrato dielétrico a base de Pentóxido de Níbio (eleição do material, compactação, sinterização e metalização) via metalurgia do pó e caracterização elétrica do substrato através da mensuração da sua permissividade elétrica e tangente de perdas; explanação sobre o Pentóxido de Níbio, culminando com a confecção da antena de microfita procedendo com a colagem do *Patch* e do plano de terra sobre o substrato, sem prescindir da linha de microfita de alimentação.

Por fim, o quarto capítulo tratará da realização das medições e simulações utilizando a antena de microfita desenvolvida sobre substrato a base de Pentóxido de Nióbio (Nb_2O_5) e, a seguir, proceder-se-á com análise e comparação dos resultados obtidos.

2 Referencial Teórico

2.1 Escorço Histórico

As primeiras antenas se presume, foram criadas por Heinrich Hertz, em 1886, com o objetivo de estabelecer o estudo e desenvolvimento das teorias eletromagnéticas. Assim, Hertz pesquisou diversos dispositivos durante a realização de seus experimentos para testar e provar a teoria eletromagnética, proposta pelo então matemático e físico James Clerk Maxwell.

As antenas produzidas por Hertz eram formadas por duas placas metálicas conectadas a dois bastões também de metal. Tais equipamentos eram ligados a duas esferas, separadas entre si por uma distância pré-determinada. Nas esferas era adaptada uma bobina, que gerava descargas por faiscamentos ou centelhamentos. De sorte que, as centelhas ou faíscas, ao atravessarem o espaço livre entre esferas, geravam ondas eletromagnéticas oscilatórias nos bastões.

Das primeiras antenas, no fim do século 19, até a atualidade, os princípios físicos que regem seu projeto e desenvolvimento foram aprimorados, com novas maneiras e tecnologias de se transmitir e receber sinais eletromagnéticos. As antenas atuais, em alguns casos, são estruturas de extrema complexidade e importância nas comunicações.

2.2 Definição de Antena

Segundo o Dicionário Aurélio, antena é a parte de um transmissor cujo potencial varia rapidamente, irradiando para o espaço ondas eletromagnéticas, ou funcionando como parte de um receptor de rádio ou de ondas eletromagnéticas. De forma que, antena é um dispositivo metálico destinado a irradiar ou recepcionar ondas eletromagnéticas, como por exemplo, ondas de radiofrequência.

Segundo Balanis (2009, p. 10) antena é uma estrutura intermediária entre o espaço livre e o dispositivo de guiamento (...) ou linha de transmissão, a qual pode assumir formas diversificadas como a de um cabo coaxial ou de um tubo oco, no caso de guia de onda, prestando-se ao transporte de energia eletromagnética da fonte transmissora até a antena ou dela ao receptor, de modo que, para primeira situação trata-se de uma antena transmissora, e no segundo caso, tem-se uma antena receptora

Logo, antena é um dispositivo que transforma energia eletromagnética guiada pela linha de transmissão em energia eletromagnética irradiada, ou o contrário, isto é, transforma energia eletromagnética irradiada em energia eletromagnética guiada para a linha de transmissão. Portanto, a função da antena é primordial em qualquer comunicação realizada por radiofrequência.

A literatura traz uma diversidade de espécies de antenas dentre as quais se pode elencar, as antenas filamentosas, sendo a mais comum dessa espécie aquela que assume a forma de um fio reto ou dipolo, ou a forma de quadrado e helicoidal. Já as antenas de abertura surgem da necessidade de se utilizar nas transmissões frequências mais altas e podem assumir diversas formas como piramidal, cônica entre outras, sendo largamente utilizadas em aplicações aeroespaciais, em virtude de facilmente serem adaptáveis à fuselagem das aeronaves. Não obstante, em sede de condições climáticas e ambientais adversas, não perdem suas características quando envolvidas com material dielétrico, visando sua proteção (BALANIS, V. 1, 2009).

Além dos tipos retrocitados, as antenas de microfita chegaram ao conhecimento popular na década de setenta. Elas são constituídas de um *patch* (ou plaqueta) metálica, disposta sobre um substrato aterrado, que podem assumir diversas formas, contudo, as retangulares e circulares são as mais utilizadas em virtude da facilidade de fabricação, simplicidade de análise, sem prescindir de suas desejáveis características de radiação, especificamente a baixa radiação de polarização cruzada.

Sob outro prisma, as antenas de microfita são discretas, moldáveis e adaptáveis às realidades estruturais em que são instaladas, adequando-se com facilidade às superfícies planas ou curvas, sem dispensar o seu baixo custo de fabricação por valer-se da moderna técnica de circuitos impressos para serem constituídas. Ademais, são mecanicamente robustas, quando montadas em superfícies rígidas, mostrando-se compatíveis com projetos de Circuito Integrado Monolítico de Microondas – MMIC. Apresentam uma versatilidade de frequência de ressonância, polarização, diagrama de radiação e impedância de entrada (BALANIS, V. 1, 2009).

2.3 Antenas de Microfita

A antena de microfita, atualmente, é considerada um tipo de antena bastante estudada, e por isso, seguramente utilizada hoje em larga escala e fielmente indicado

por projetistas em todo o mundo. O estudo dessa antena, já atingiu certa maturidade, onde técnicas bem aprimoradas e comprovadas puderam ser aplicadas e ainda assim, se faz necessário investigar outros pontos sobre o comportamento de seus parâmetros. Muito dos avanços tecnológicos ocorridos nas antenas *Patch* aconteceram em um período relativamente curto de tempo de uma ou duas décadas. Assim, não se deve afirmar que o estudo sobre as antenas de microfita está estagnado, haja vista, o surgimento de uma crescente produção de publicações, advindas de pesquisas desenvolvidas e o seu extenso uso para fins industriais e comerciais. (BALANIS, 2008)

O que se busca agora é por projetos cada vez mais inovadores, juntamente com a fabricação das antenas de microfita através de métodos confiáveis. O incentivo para tal, está no baixo custo de produção, menor peso, design delgado, já que, os sistemas modernos exigem antenas com tais características. Redução de custos, no entanto, depende da capacidade do projetista para controlar com precisão o processo de fabricação, e isto, por sua vez, em geral, exige que as estruturas inovadoras do protótipo possam ser modeladas matematicamente de forma adequada. É nestes últimos aspectos que surgem os desafios para os especialistas em antenas, a saber: a busca por uma modelagem computacional mais precisa, a busca por novos materiais e novas técnicas de produção.

O conceito de antenas de microfita foi atribuído a Greig, Englemann e Deschamp. Enquanto estudavam, verificou-se a emissão de uma irradiação indesejada provocada pelo perfil delgado da antena, situação que foi resolvida com a redução das dimensões do substrato sob a microfita condutora, amenizando os efeitos da radiação, criando assim a microfita. (VILLEGAS e RUVALCABA, 2010)

Com o advento do transistor como precursor do desenvolvimento dos circuitos impressos planares era provável que o interesse principal mirasse o desenvolvimento de filtros de micro-ondas de menor custo. Então Lewin considerou a natureza da radiação a partir da linha de microfita, mas, aparentemente, havia pouco interesse em utilizar a radiação perdida (JAMES and HALL, 1989).

O conceito de antena de microfita permaneceu latente até o início da década de 1970, quando houve uma necessidade imediata da utilização de antenas de perfil discreto sobre a nova geração emergente de mísseis. Doravante, tratou-se o desenvolvimento do conceito da antena de microfita com seriedade em virtude do

surgimento de muitas publicações advindas de pesquisas envolvendo a espécie de antena em estudo. O período mais referenciado se deu em 1979. Um workshop inicial foi realizado em Las Cruces, Novo México e seus trabalhos foram destilados em edições especiais da IEEE. Naquela época, dois livros foram publicados por Bahl, Bhartia e James, e Hall e Madeira que permanecem em uso atualmente. Outro desenvolvimento mais especializado e inovador foi publicado como uma monografia de pesquisa por Dubost, onde a antena flat-plate foi abordada do ponto de vista de dipolos apoiados em substratos que, geralmente, possuem apenas parte do volume disponível (JAMES and HALL, 1989).

No início de 1980, as antenas discretas não eram apenas um ponto relevante em trabalhos e publicações provenientes de pesquisas, mas também um marco no realismo prático, culminando com a fabricação das antenas *Patch*. Os Fabricantes de substrato melhoraram suas especificações e ofereceram faixas mais amplas de produtos susceptíveis de funcionamento em condições ambientais extremas. Contudo, o custo desses substratos mostrou-se elevado.

Um fator importante emergiu quando se constatou que os métodos analíticos dos elementos e parâmetros, como impedância de entrada, da antena de microfita, eram insuficientes para atender as necessidades da realidade prática pretendida. Foi também verificado que as interligações dos alimentadores de elementos de conexão, em uma grande variedade, estavam cheios de problemas e novas abordagens foram necessárias onde os alimentadores e os elementos foram considerados como uma entidade completa, um único bloco. Mais recentemente o termo "arquitetura conjunta " vem sendo utilizado para enfatizar a importância da escolha da Topologia da matriz e o fato de que os alimentadores podem não ser, necessariamente, ligados de modo livre a elementos impressos, mesmo que estes estejam em si bem aperfeiçoados. Quanto a isso, serão os sistemas de comunicação quem indicará, de acordo com a necessidade, qual a topologia mais adequada ao projeto, no que atine à forma de alimentação (JAMES and HALL, 1989).

Deste modo, hoje surgem sistemas de comunicação que necessitam, para seu bom funcionamento de uma maior largura de banda. Com o advento de tais sistemas, necessário se faz buscar por técnicas emergentes que propiciem aumentar a largura de

banda em que operam as antenas de microfita. Tal área de estudo se encontra em ascensão.

Propriedades de controle da polarização de antenas impressas é outra área de atividade decorrente em grande parte da consciência para uma maior utilização das propriedades de polarização de ondas, particularmente em radares. Em aplicações de defesa, sistemas que têm uma instalação eletrônica, ao invés de mecânica de raio de varredura, estão atraindo muito esforço do conceito de pesquisa de "arquitetura ativa conjunta", onde pacotes de semicondutores e elementos radiantes são integrados em aberturas planares. O custo de tal matriz é muito elevado e todo o conceito é *state-of-the-art* (estado da arte). Isso nos traz para o presente e como se enxergará, doravante, o futuro imediato das antenas discretas (JAMES and HALL, 1989).

Um ponto raramente mencionado é o fato de que a tecnologia de substrato impresso é prontamente processada em laboratórios universitários e permanece uma fonte abundante de problemas eletromagnéticos complexos. Daí surgirão publicações de pesquisa nesta área, em paralelo com o desenvolvimento industrial, será mais provavelmente dominada por dois aspectos:

- A busca de modelos matemáticos mais precisos que predizem antenas práticas, portanto, o aperfeiçoamento de técnicas de CAD na fabricação.
- A criação de antenas inovadoras para coincidir com a procura de novos sistemas.

Quanto ao futuro distante, só se pode extrapolar as tendências atuais referentes a matrizes de feixes eletronicamente digitalizados. Muitos novos sistemas, no entanto, particularmente na indústria aeroespacial, só são viabilizados com a existência do conceito de antena impressa, e aqui reside a grande força motriz, onde sistemas novos decorrem exclusivamente de projetos de antena inovadoras. Estamos, assim, inconscientemente convergindo para o conceito de sensores distribuídos, tão comuns no mundo dos insetos e animais, onde informações são normalmente colhidas numa variedade de formas para melhor se adaptar a uma determinada situação. Tomando a comparação e dando um passo à frente, nós, portanto, esperamos que conforme as aberturas distribuídas para exigir um significativo back-up de técnicas de processamento de sinal, que ascendem a fazer uso de informações temporais em sinais e ruídos. Colocando dessa maneira, essas ideias não são tão inacessíveis, porque muitos desses

conceitos adaptativos podem ser reconhecidos em alguns dos nossos novos sistemas de radar e de comunicação, em particular para a defesa (JAMES and HALL, 1989).

Nesta perspectiva, o conceito de antena impressa é, portanto, como uma porta de entrada para a compatibilidade do sistema e a otimização dos sensores, abrangendo as várias facetas da conformabilidade, baixos custos, integração de semicondutores, controle do padrão de radiação eletrônica e uma oportunidade para explorar as técnicas de processamento de sinal por completo, usando o poder da computação moderna. As perspectivas são de fato emocionantes, e frisando a importância do conceito das antenas de microfita e sua contínua evolução na área de projetos de sistemas eletrônicos.

Fatores como tamanho, peso, custo, desempenho, facilidade de instalação e perfil aerodinâmico podem ser limitantes quando se trata de aplicações aeronáuticas, aeroespaciais, de satélite e de mísseis de acurado desempenho. Para tais aplicações, se faz necessário a utilização de antenas discretas. Atualmente, outras aplicações comerciais e governamentais, a saber, rádio móvel e comunicação sem fio, por exigirem especificações técnicas semelhantes, reclamam o uso daquelas antenas discretas, no caso, antenas de microfita. Como externado anteriormente, tais antenas são discretas, moldáveis e adaptáveis às realidades estruturais em que são instaladas, adequando-se com facilidade às superfícies planas ou curvas, sem dispensar o seu baixo custo de fabricação por valer-se da moderna técnica de circuitos impressos para serem constituídas. Ademais, são mecanicamente robustas, quando montadas em superfícies rígidas, mostrando-se compatíveis com projetos de circuito integrado monolítico de microondas – MMIC. Apresenta uma versatilidade em uma grande faixa de frequência de ressonância, polarização, diagrama de radiação e impedância (BALANIS, V. 2 2009).

Entretanto, ao lado de suas inúmeráveis vantagens, as antenas *patch* de microfita, apresentam uma gama de desvantagens operacionais, entre as quais se destacam a sua pequena largura de banda perdas consideráveis, mesmo com baixo ganho; possibilidade de excitação de ondas de superfície e consequente diminuição da eficiência; radiações indesejáveis dos alimentadores, junções e possíveis circuitos de casamentos; baixa capacidade de manuseio de potência, devido às próprias características da estrutura da microfita, baixa potência, elevado Q (fator de franjamento), pureza de polarização

pobre, fraco desempenho de varredura, radiação espúria de alimentação e pequena largura de banda de frequências, chegando a pouco mais de 1%. (OLIVEIRA et al. 2001)

Ainda segundo Balanis (2009), as principais vantagens das antenas de microfita frente às outras antenas de microondas são: sustentação mecânica com pequeno peso e volume reduzido; configuração de perfil plano fazendo com que possam ser adaptadas facilmente à superfície de montagem; baixo custo de fabricação, diminuído pela produção em série; facilmente construída com pequena espessura, o que não perturba a aerodinâmica de veículos aeroespaciais; polarizações lineares ou circulares podem ser conseguidas, em alguns casos, pela simples troca da posição do ponto de alimentação. Na maioria dos casos não é necessária a confecção de cavidades externas; as antenas de microfita são compatíveis com projetos modulares, assim dispositivos de estado sólido podem ser conectados ou integrados diretamente na placa de substrato; as linhas de alimentação e circuitos de casamento podem ser fabricadas simultaneamente com a estrutura da antena.

2.3.1 Características Essenciais das Antenas de Microfita

Segundo Balanis (2009), nos Estados Unidos da América Deschamps (1953), e quase na mesma época Gutton e Baissinot (1955) na França, fizeram as primeiras publicações sobre a antena de microfita. Porém, nenhuma publicação foi feita na literatura após o trabalho original de Deschamps em um período de 18 anos até que Byron (1970) propôs um irradiador de fita condutora separada do plano de terra por um substrato dielétrico.

Na sua configuração mais simples, a antena de microfita consiste em um *patch* irradiante em um dos lados do substrato dielétrico, enquanto no outro lado existe um plano de terra. Essa geometria é mostrada na Figura 2 a seguir:

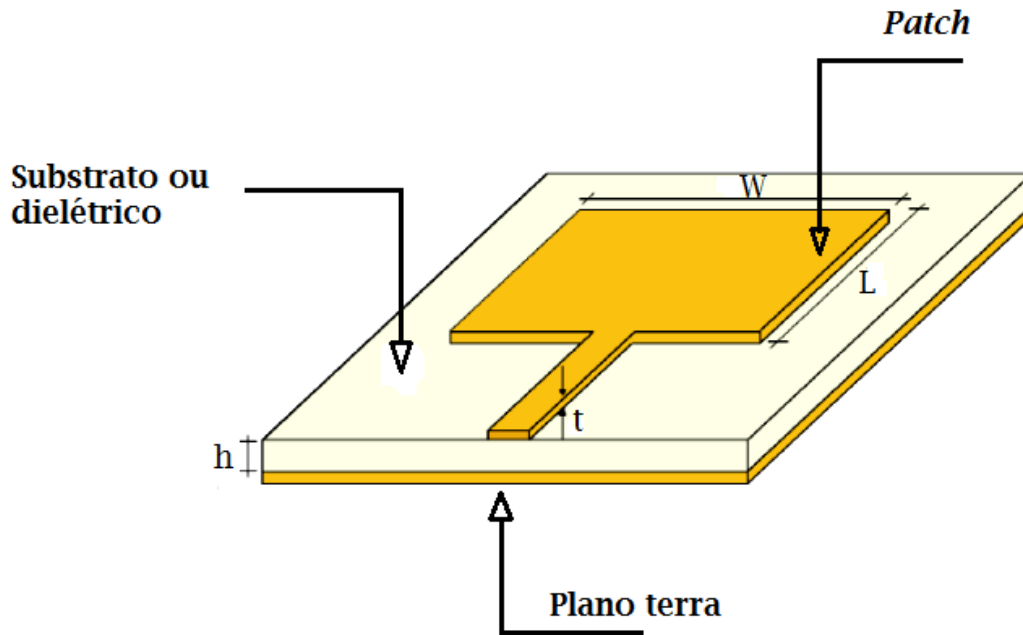


Figura 2 – Geometria da Antena Planar do tipo *Patch* na forma retangular

Fonte: Autoria própria.

Como se depreende da figura anterior, as antenas de microfita são constituídas de um *patch* (ou plaqueta) metálica, disposta sobre um substrato aterrado, ou camada dielétrica que fica entre a plaqueta (fita metálica) e o plano de terra. Uma das características das antenas *patch* é que suas dimensões transversais são comparáveis. Assim, para um *patch* retangular de microfita, a sua dimensão W (largura da plaqueta) é da mesma ordem de grandeza da sua dimensão L (comprimento da plaqueta). Para a linha de fita de alimentação t descreve a espessura da linha de fita. No que corresponde ao substrato h designa a sua espessura.

A antena *patch*, hipoteticamente, pode assumir qualquer forma geométrica. Contudo, para a simplificação da análise e previsão do desempenho normalmente são utilizadas as formas geométricas convencionais, como as retangulares, circulares e as do tipo gravata ou *bowtie* antenas. O material condutor geralmente é o cobre e em algumas aplicações em ondas milimétricas o ouro, devido a sua maior condutividade. Contudo, o *Patch* ou plaqueta pode assumir diversos formatos conforme como mostra a Figura 3 a seguir:

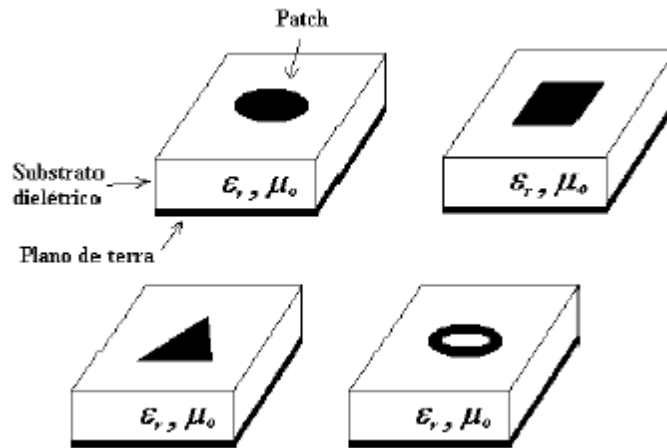


Figura 3 – Antenas de Microfita – Formatos de *Patch*.

Fonte: Balanis, (2009).

Logo, a configuração básica de uma antena de microfita constitui-se de um substrato dielétrico onde em uma das faces é impresso um condutor irradiante ou *patch*, termo que pode ser traduzido como placa pequena, e na outra face é impresso um plano de terra. Diferentes geometrias e características dos substratos usados nas antenas (permissividade elétrica; permeabilidade magnética), como também a condutividade elétrica dos metais usados na confecção dos condutores, podem modificar o desempenho da antena (CARNEIRO FILHO, 2010).

No projeto de antenas de microfita, diversos materiais podem ser utilizados como substrato. Geralmente, as constantes dielétricas destes materiais assumem valores da ordem de $2,2 \leq \epsilon_r \leq 12$. Os substratos mais adequados para antenas que exigem um bom desempenho são extremamente finos e possuem constante dielétrica de valor baixo, já que permitem uma maior eficiência, maior largura de banda e campos mais desprendidos, facilitando a radiação no espaço. Contudo, substratos delgados que possuam elevados valores de constante dielétrica são desejáveis na aplicação de circuitos que envolva a faixa de frequência de microondas, vez que, exigem campos mais confinados, com o objetivo de reduzir radiação e acoplamentos indesejáveis, e elementos de pequena dimensão. Logo, devido à perdas maiores, tais substratos não são tão eficientes, resultando em larguras de banda relativamente menores. É preciso atingir um equilíbrio entre o bom desempenho da antena de microfita e o bom projeto de circuito de microondas (BALANIS, V. 2, 2009).

2.3.2 Permissividade Elétrica do Substrato (ϵ)

Segundo Shafai e Kishk (1989), aumentando a permissividade do substrato se reduz o tamanho do *patch* e, conseqüentemente, o tamanho da zona de radiação e uma ampliação no padrão de radiação. Conforme as Figuras 4 e 5 para o modo de propagação TM_{11} , em ambos os planos E e H do *patch*.

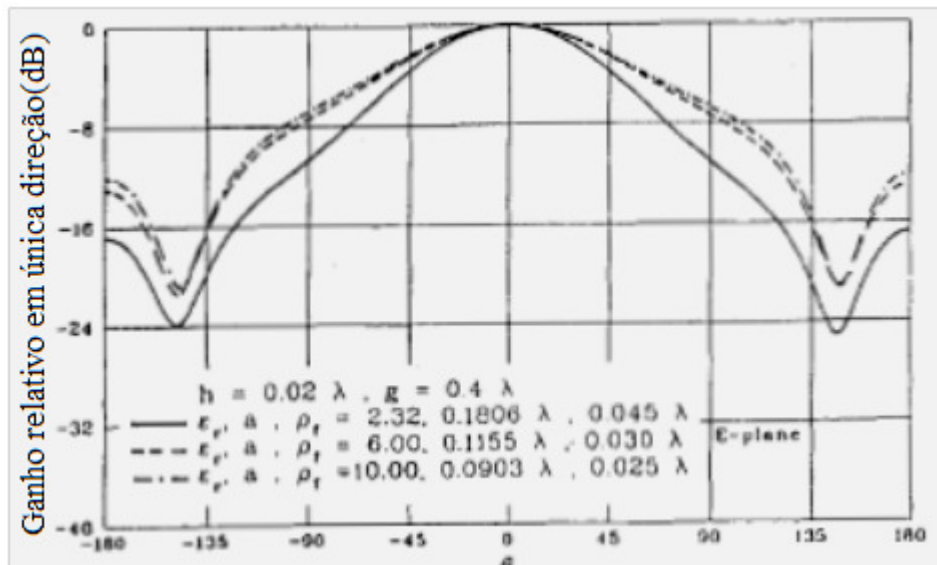


Figura 4 – Padrões de radiação E-plano de um patch circular com diferentes permissividades substrato.

Fonte: Shafai e Kishk (1989)

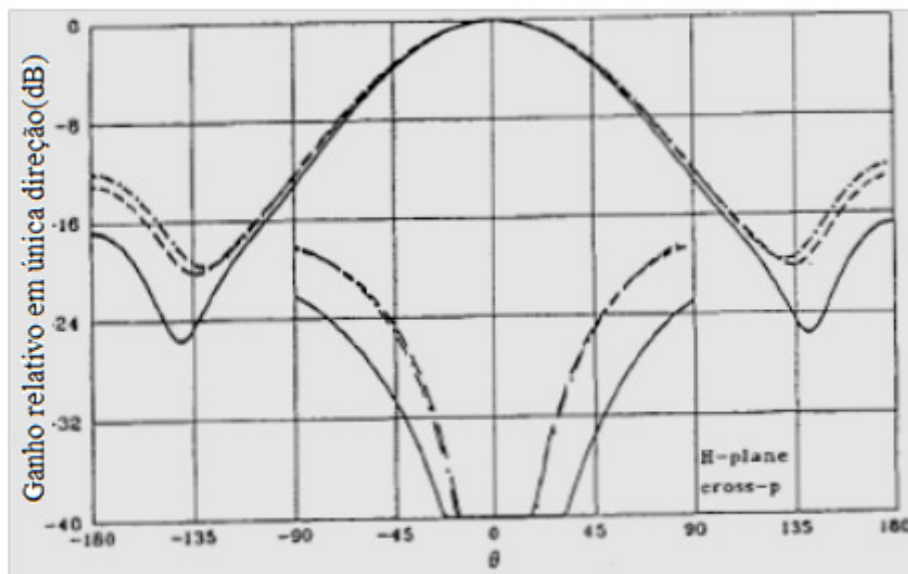


Figura 5 – H-plano e polarização cruzada padrões de Figura 4.

Fonte: Shafai e Kishk (1989)

2.3.3 Efeito da espessura do substrato

$\epsilon_r = 2.32, g = 0.4\lambda$
 — $(h, a, \rho_t) = (0.02, 0.1806, 0.045)\lambda$
 - - $(h, a, \rho_t) = (0.04, 0.1732, 0.044)\lambda$
 - · - $(h, a, \rho_t) = (0.06, 0.1675, 0.041)\lambda$
 - · · - $(h, a, \rho_t) = (0.10, 0.1590, 0.039)\lambda$

E-plane

Fonte: Shafai e Kishk (1989)

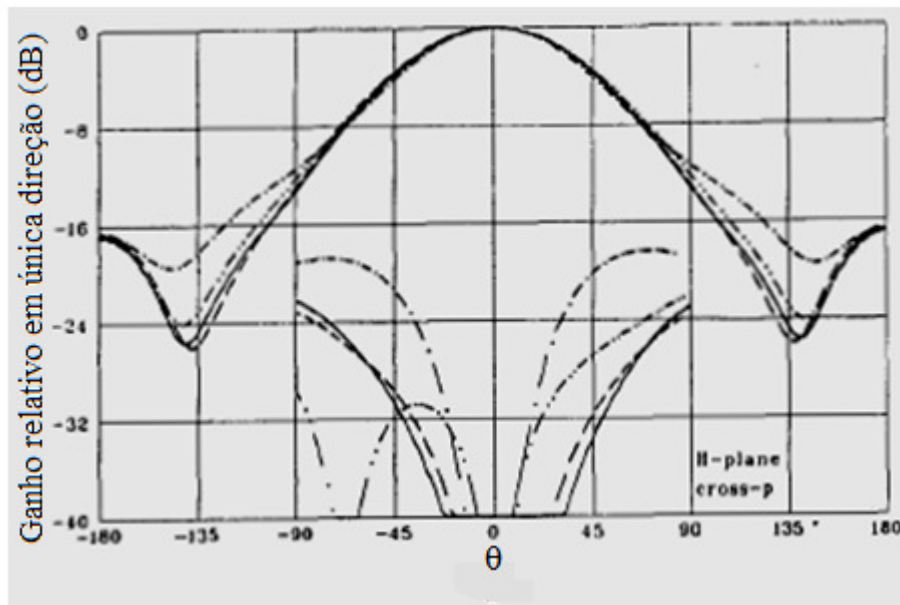


Figura 7 – H-plane e padrões de polarização cruzada da Figura 6.

Fonte: Shafai e Kishk (1989)

Além disso, é interessante notar que o efeito do substrato pode assemelhar-se a um diluente, com um substrato de permissividade superior, o qual, a partir da Figura 4 pode afetar os padrões do plano E, significativamente. No entanto, os resultados da Figura 6 mostram o contrário, onde os padrões do plano E são relativamente independentes da variação da espessura do substrato (h). Isto pode ser compreendido considerando o efeito destes dois parâmetros. A permissividade mais elevada reduz a dimensão do *patch* e da extensão dos campos de franja. Por conseguinte, a radiação é devido a um estreito anel de corrente magnética em torno da periferia do *patch*, que normalmente propicia padrões de radiação assimétricos. Um substrato mais grosso, por outro lado, não reduz de forma significativa o tamanho da plaqueta, mas estende-se a zona dos campos de franja, resultando assim em uma amplo anel de radiação.

As antenas de microfita possuem um elemento radiante que é disposto sobre substratos dielétricos. Tal fita metálica ou plaqueta radiante pode assumir variadas formas como quadrada, retangular, fita estreita (dipolo), circular, elíptica, triangular entre outras.

Dentre algumas aplicações das antenas de microfita se tem: comunicação via satélite; radar Doppler e outros tipos; comando e controle; telemetria de mísseis; sensoriamento remoto; construção de radiadores biomédicos (SHAFAI e KISHK, 1989).

2.4 Formas de Alimentação das Antenas de Microfita

Inúmeras são as configurações utilizadas para alimentar as antenas de microfita. Dentre as mais usadas estão a linha de microfita e o cabo (ou sonda) coaxial, tais formas classificadas como modo de alimentação direto. De outro modo, tem-se acoplamento por abertura e acoplamento por proximidade como sendo modos de alimentação indireta, conforme apresentado na Figura 8 a seguir.

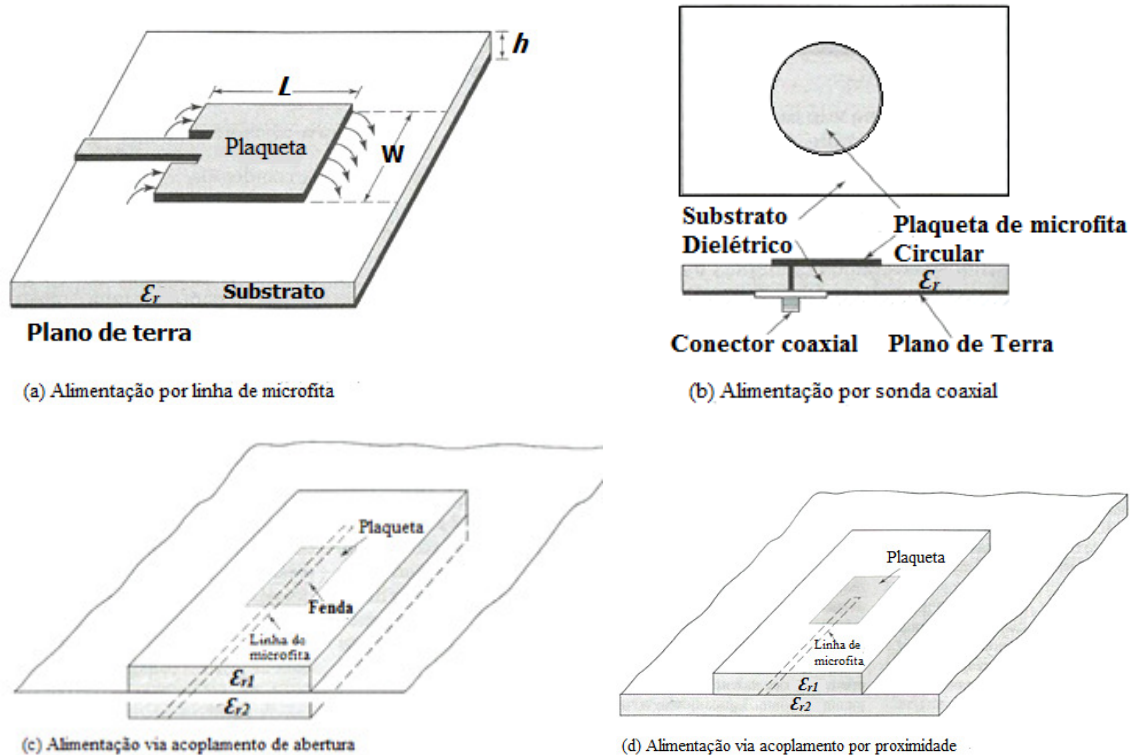


Figura 8 – Formas de Alimentação da Antena *Patch*

Fonte: Balanis (2009) – Adaptada.

A opção por um método adequado de alimentação para a excitação de uma antena *patch* de microfita requer a observância de fatores determinantes, a saber: perfeito casamento de impedância entre o *patch* e a alimentação, e modos de amenizar os efeitos da radiação indesejada (MORAIS, 2011).

Para cada método de alimentação é possível estabelecer uma representação através de um circuito equivalente, assim demonstrado na Figura 9 a seguir.

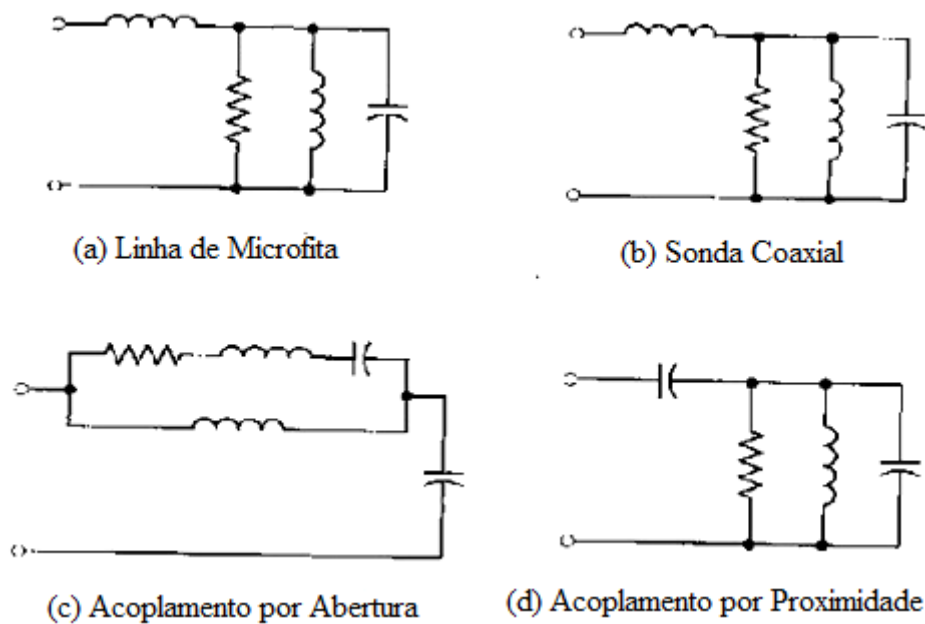


Figura 9 – Circuitos equivalentes para alimentadores.

Fonte: Balanis (2009) – Adaptada.

2.4.1 Alimentação por meio de Linha de Microfita

O método de alimentação através da linha de microfita consiste numa fita condutora que, via de regra, possui uma largura mais estreita que a do *Patch*. Ela é de fácil construção e propicia um casamento simples de modo a controlar o ponto de inserção. Possui uma modelagem muito simples, contudo, elevando-se a espessura do substrato, aumenta-se a geração de ondas de superfície e radiação espúrias face à alimentação, limitando, praticamente, a largura de banda.

Deste modo, a fita condutora é impressa sobre o mesmo plano do substrato que a antena permitindo que a referida estrutura permaneça na forma planar. É preciso enfatizar que para esse tipo de alimentação sob análise o que se entende por um casamento simples, consiste em um bom casamento de impedância no qual se controla a largura da fita condutora sobre o substrato com espessura definida, além de fazer-se uso de técnicas de cavidades como *gaps* e truncamentos de plano de terra sob a junção das fita condutora de microfita e o *patch* radiante. Tal forma de alimentação é demonstrada na Figura a seguir.

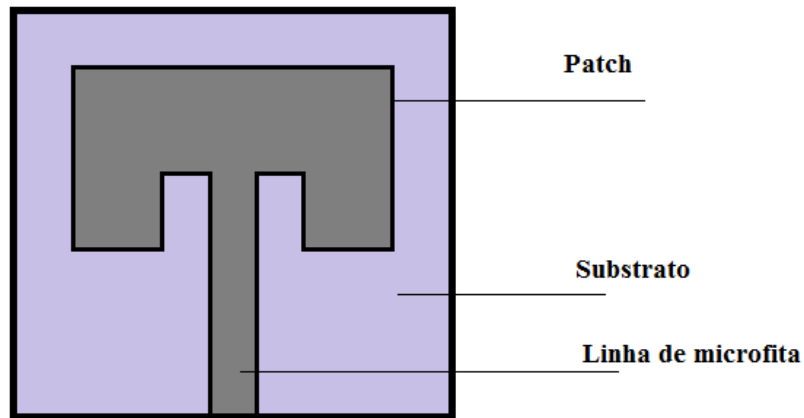


Figura 10 – Antena de microfita alimentada por uma linha de microfita indentada para casamento de impedância.

Fonte: Moraes (2011) – Adaptada.

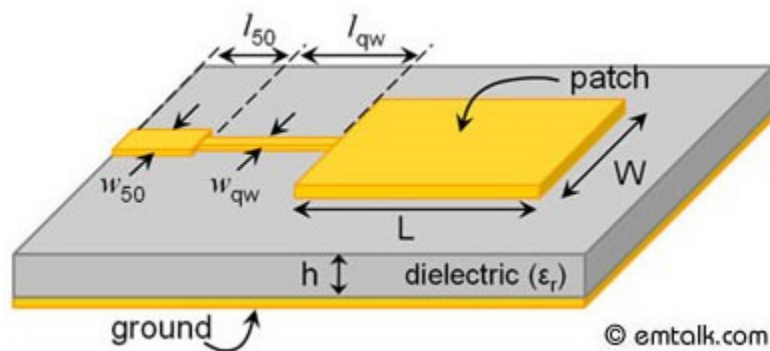


Figura 11 – Antena planar com alimentação com uma linha de 50 Ω (L_{50}, W_{50}) e uma adaptação de 1/4 de comprimento de onda (L_{qw}, W_{qw})

Fonte: <http://paginas.fe.up.pt/~ee98172/antenasmicrostrip.html>
15/08/2014, às 16h33min.

2.4.2 Alimentação através de Cabo Coaxial

Na alimentação através de um cabo coaxial, o condutor interno do cabo coaxial é conectado ao *patch* irradiante e o condutor externo ao plano de terra. Tal forma de alimentação da antena de microfita é de fácil construção e oferece um bom casamento de impedância, oferecendo baixa radiação espúria. Contudo, apresenta uma pequena largura de banda, além de ser mais difícil de modelar, sobretudo em substratos mais espessos, $h > 0,02\lambda_0$ (BALANIS, 2009).

Nesta maneira de alimentar antenas *patch* de microfita, um cabo coaxial atravessa o plano de terra e o substrato dielétrico, atingindo o *patch* radiante. É importante ressaltar que toda a junção do cabo coaxial ao alcance da plaqueta radiante far-se-á através de perfuração e a sua utilização depende do projetista da antena.

A facilidade de se obter um excelente casamento de impedância está vinculado à localização do cabo coaxial, quando por ocasião da alimentação da antena de microfita. A figura a seguir ilustra o modo de alimentação em estudo.

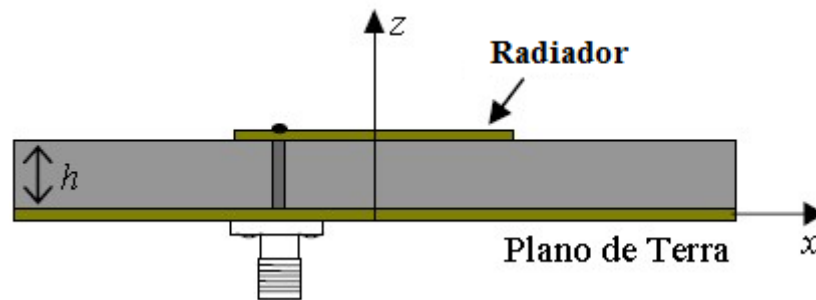


Figura 12 – Antena de microfita alimentada por linha coaxial.

Fonte: <http://paginas.fe.up.pt/~ee98172/antenasmicrostrip.html>, 15/08/2014 às 16h33min

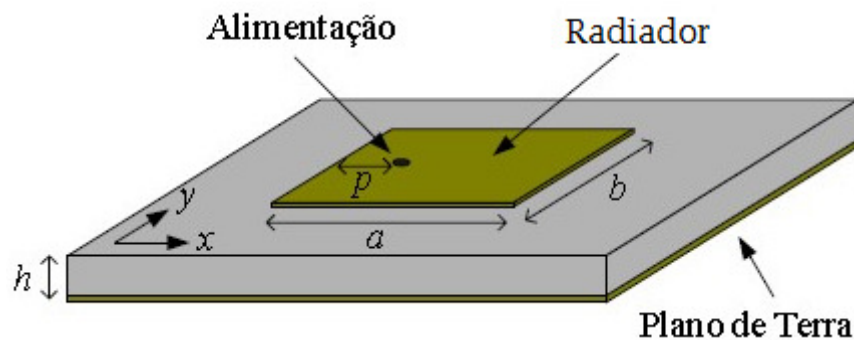


Figura 13 – Antena de Plaqueta de microfita retangular com alimentação coaxial.

Fonte: <http://paginas.fe.up.pt/~ee98172/antenasmicrostrip.html>. 15/08/2014. 16h33min

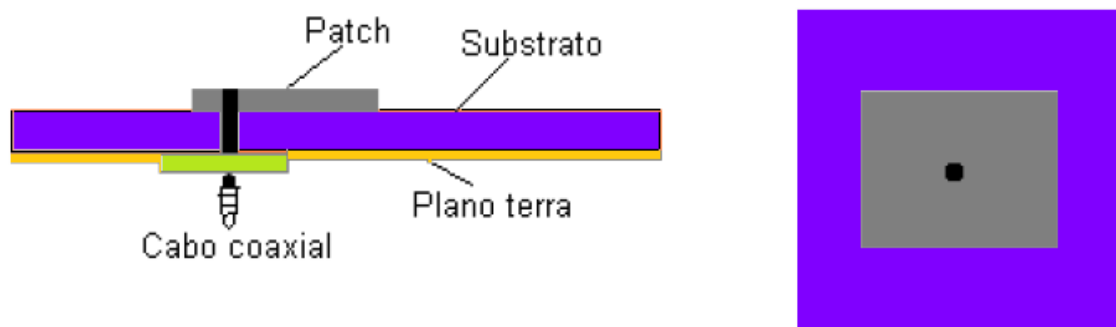


Figura 14 – Alimentação de antenas *patch* por linha coaxial.

Fonte: Moraes, (2011).

Ambas as formas de alimentação sobreditas possuem assimetrias imanentes, geradoras de modos de transmissão de ordem superior e capazes de produzirem radiação

de polarização cruzada (BALANIS, 2009). A solução, na busca por suplantar tais obstáculos, consistiu em criar outra forma de alimentação de modo que suprimisse todo o contato da fonte de alimentação com a antena de microfita. Assim, surge o modo de alimentação através de acoplamento por abertura, apresentada a seguir.

2.4.3 Alimentação por acoplamento de abertura

A forma de alimentação por acoplamento de abertura é então erigida, colocando dois substratos sobrepostos entremeados por um plano de terra, de modo que, na face inferior antena é posta uma linha de microfita, cuja energia é acoplada ao *patch* por meio de uma abertura no plano de terra disposto entre os dois substratos, como demonstrado na Figura a seguir.

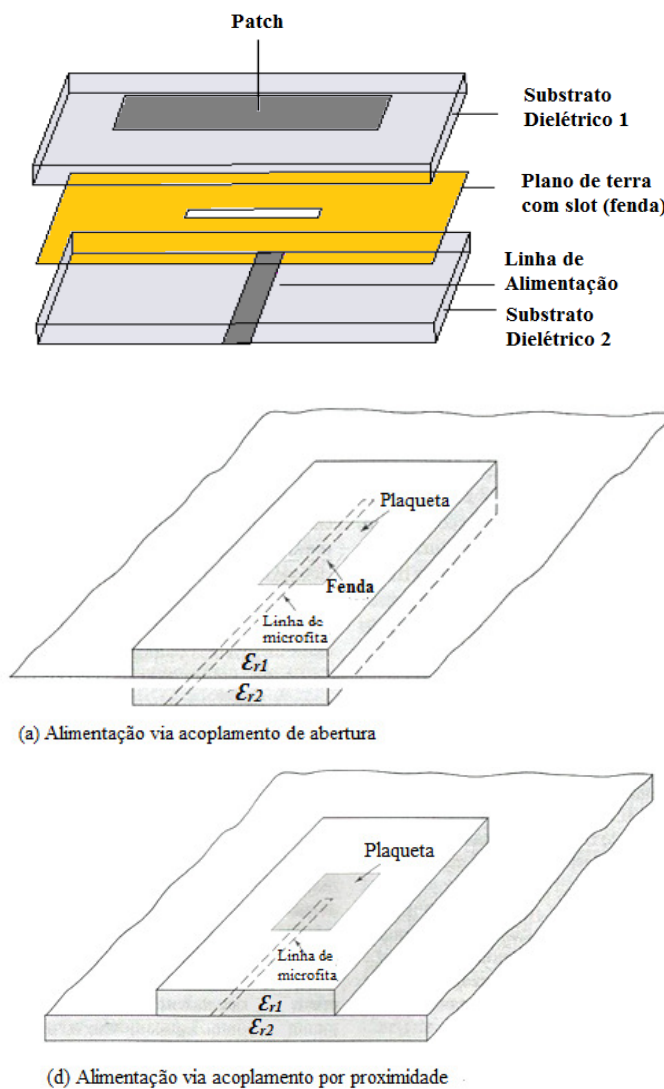


Figura 15 – Alimentação por acoplamento (a) por abertura e (b) por proximidade

Fonte: Balanis (2009) – Adaptada.

É de relevância ressaltar que, o substrato inferior é composto de um material de alta constante dielétrica, e o substrato superior de uma espessa camada de material de baixa constante dielétrica, de sorte que, o plano de terra entre os dois substratos funciona como isolante para a alimentação do elemento radiante, amenizando, desta forma, a interferência da radiação espúria na constituição do diagrama e na pureza de polarização (BALANIS, V. 2, 2009)

Quanto à otimização do projeto, considerando a forma de alimentação em análise, aquela sofrerá influência dos parâmetros elétricos do substrato, da largura da linha de alimentação, das dimensões e da posição da abertura da fenda. Quando se efetua o casamento de impedância, ele efetiva-se através do controle da largura da linha de alimentação e do comprimento da fenda.

As características de tal modo de alimentação, quando comparadas com as primeiras retroanalisadas, não são satisfatórias para a excitação das antenas *patch* de microfita, haja vista, ser de construção difícil e propiciar uma largura de banda estreita. Contudo, em que pese tais problemas, o acoplamento por abertura possui uma modelagem simplificada, além de apresentar uma moderada radiação espúria.

Com o objetivo de auferir os principais parâmetros da antena a ser produzida sobre o substrato de Pentóxido de Níbio (Nb_2O_5), far-se-á uso do modo de alimentação através da *Linha de Microfita*, em virtude da facilidade de se obter um excelente casamento de impedância, por considerar a linha de alimentação como um único bloco pertencente ao elemento radiante.

2.5 Métodos de Análise das antenas de Microfita

Em se tratando da análise das antenas *patch* de microfita existem diversos métodos dentre os quais se pode citar: *a linha de transmissão (ou método quase estático)*, *o método da cavidade e o de onda completa*. O presente trabalho opta por trabalhar com o método da cavidade, motivo pelo qual, ater-se-á ao estudo de tal modelo de análise.

O modelo da cavidade é menos preciso, contudo, mais simples que o de onda completa, porém mais preciso que o da linha de transmissão. Ele prevê excelente recepção física, em que pese ser bastante dificultoso o seu uso para modelar acoplamento.

2.5.1 Método da Cavidade

As antenas *patch* de microfita são comparadas a cavidades carregadas com dielétrico, apresentando ressonâncias de ordem elevadas. Assim, os campos normalizados no interior do substrato dielétrico podem ser determinados com maior acuidade considerando a região como uma cavidade delimitada por condutores superiores e inferiores e por paredes magnéticas, simulando um circuito aberto no transcurso perimetral do *patch*. O método da cavidade é um modelo aproximado, e, como tal, propicia uma impedância de entrada reativa, ou seja, com valor de ressonância nulo ou infinito, sem irradiar potência. Contudo, tendo como verdadeiros os campos próximos aos gerados pelo método em estudo, valores calculados de diagrama de radiação, admitância de entrada e frequências de ressonância são comparados, satisfatoriamente, com valores experimentais (BALANIS, V. 2, 2009).

Desta forma, o método de análise em consideração supõe a antena de microfita como sendo uma cavidade, em que, o elemento *patch* de microfita e o plano de terra são considerados paredes elétricas. Já os contornos laterais comportam-se como paredes magnéticas, em virtude da corrente no elemento de microfita não possuir componentes normais à borda do *patch*. É importante ressaltar que os campos nas antenas comportam-se como campos da cavidade que se expandem em termos de modos ressonantes, cada qual operacionalizando em sua frequência de ressonância. Porquanto, é propriedade do referido modelo de análise reduzir a antena de microfita a uma cavidade fechada, capaz de suportar inúmeros modos ressonantes e permitir que a radiação se dê a partir da abertura constituída pela borda do radiador e pelo plano de terra (NÓBREGA, 2008).

Para o método de análise em estudo, ao se levar em conta a utilização de substratos de baixa espessura, o campo no interior da cavidade será uniforme ao longo da espessura do substrato dielétrico. Porém, os campos sob o *patch*, para suas formas mais usuais, podem ser expressos como um somatório dos vários modos ressonantes do ressonador de duas dimensões.

Quanto aos efeitos da radiação em torno das bordas, estes são eliminados conforme a elevação do tamanho do *patch*, de modo que as reais dimensões sejam

superiores as dimensões físicas da plaqueta. Assim, o efeito da radiação da antena e as perdas do condutor são considerados em consonância com a tangente de perdas do substrato dielétrico. No que atine ao campo distante e à potência irradiada da corrente magnética equivalente, ambas são calculados seguindo o contorno da borda.

A incorporação do efeito da radiação no método da cavidade se daria pela introdução de uma condição limite de impedância às paredes da cavidade. Os efeitos de borda e a potência irradiada no interior da cavidade são desconsiderados, tendo em vista eles serem mais evidentes nas suas extremidades. Importante externar que, a solução para o campo distante com paredes de admitância, é de avaliação complicada. Muito embora o método da cavidade seja adequado à análise de plaquetas que assumam qualquer forma geométrica, ainda assim, os *patches* de forma retangular possuem análise mais simples em face ao uso do referido modo de análise (NÓBREGA, 2008).

O presente trabalho consiste em construir antenas de microfitas com *patch* circular, motivo pelo qual se dará atenção à utilização, como método de análise, o modo da cavidade aplicada às antenas de microfita cuja plaqueta assume o formato circular.

Segundo Balanis (2009), para uma antena de microfita cujo *patch* é circular, os modos ressonantes por ela suportados podem ser conhecidos considerando a plaqueta, o plano de terra e o substrato dielétrico entre ambos, como sendo uma cavidade circular. Para as antenas de microfita com plaqueta na forma circular, os modos ressonantes por ela suportados, considerando a espessura do substrato pequena ($h \ll \lambda$) são modos TM^Z , em que Z é disposto perpendicularmente ao *patch*. No que pertine às dimensões da plaqueta, é preciso considerar o raio e exercer sobre ele um certo controle, de sorte que, muito embora uma variação do tamanho do raio não venha ocasionar uma alteração na ordem dos modos ressonantes, contudo, muda o valor absoluto da frequência de ressonância de cada um.

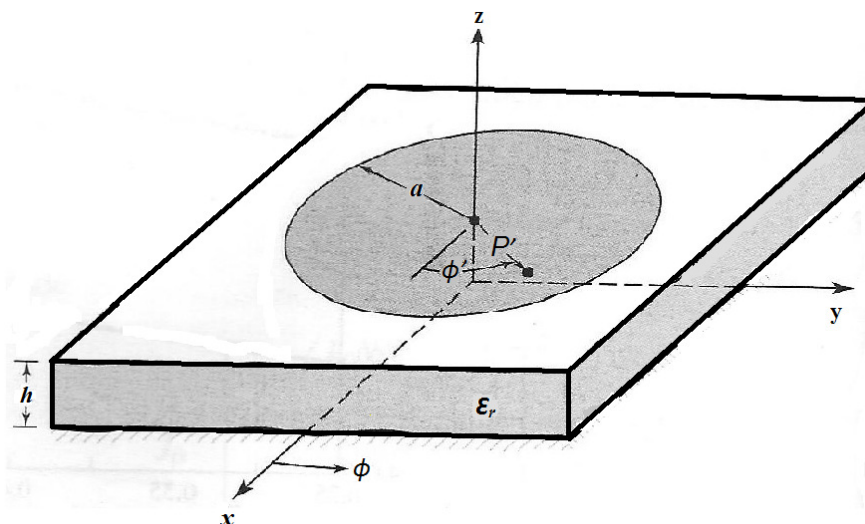


Figura 16 – Geometria de uma antena de placa circular de microfita

Fonte: Balanis (2009).

Sem prescindir da possibilidade da antena de placa circular ser analisada pelo método de onda completa, convenientemente, sua análise só poderá ser efetivada valendo-se do método da cavidade, e, para tal, far-se-á uso das coordenadas cilíndricas. Desta forma, a cavidade é constituída por dois condutores perfeitos, a saber, o *patch* e o plano de terra, assim dispostos, o primeiro na parte superior e o segundo na parte inferior. Compõe também a cavidade circular uma parede cilíndrica condutora magnética perfeita em torno do contorno periférico da cavidade. Quanto ao material dielétrico, ele é considerado truncado para além da extensão do *patch* (BALANIS, V. 2, 2009).

2.5.2. Simulação Numérica

Este trabalho se valerá dos métodos de análise de antenas de microfita tais como os modelos aproximados, cuja formulação toma como base a distribuição de corrente magnética equivalente ao redor das margens do *patch*. Na caracterização das antenas de microfita, tais modelos possuem uma precisão satisfatória ate determinados valores de frequências. Assim, tem-se o modelo de onda completa, cuja descrição dos parâmetros de antenas de microfita foi largamente utilizada e encontrada em publicações a partir do início dos anos 80. Com uma formulação matemática mais rigorosa, estes modelos conseguem resultados mais precisos e resolvem problemas em frequências mais elevadas. Têm-se também o uso de simulações numéricas, que demanda um esforço computacional bem maior. Vale lembrar que o objetivo de todos os métodos numéricos

em eletromagnetismo é encontrar soluções mesmo que aproximadas para as equações de Maxwell (ou de equações derivadas delas) que satisfaçam as condições iniciais e de fronteira ou de contorno.

Esta modelagem eletromagnética consiste no processo de análise da interação dos campos eletromagnéticos entre objetos físicos e o meio ambiente. Sumariamente, sendo empregado para calcular o desempenho da antena, sua compatibilidade eletromagnética, seção transversal de radar e propagação de ondas eletromagnéticas no espaço livre.

Entre os métodos numéricos passíveis de serem aplicados na análise de antenas de microfita tem-se:

- Metodo dos momentos (MoM - *Method of Moments*);
- Metodo dos elementos finitos (FEM - *Finite Element Method*);
- Metodo das diferencas finitas no dominio do tempo (FDTD - *Finite-Difference Time-Domain Method*);]
- Metodo das diferencas finitas no dominio da frecuencia (FDFD - *Finite-Difference Frequency-Domain Method*);
- Metodo da Linha de Transmissão (TLM – *Transmission Line Method*).

O presente trabalho utilizou de *softwares* existentes no mercado cuja finalidade é analisar as antenas *Patch* de microfita, dentre os quais se pode destacar o *HFSS®* (*HFSS - High Frequency Structure Simulator*).

O uso destes softwares teve por objetivo melhorar, através de simulações numéricas, o protótipo da antena projetada ajustando-se os parâmetros físicos das antenas. Podendo ainda ser usado na otimização das dimensões físicas destes substratos e das antenas *patch* de microfita objeto de desenvolvimento do presente trabalho.

O Software *Ansoft HFSS®* determina os parâmetros de espalhamento de estruturas passivas e a distribuição tridimensional de campos eletromagnéticos no interior de uma estrutura utilizando o Método dos Elementos Finitos (FEM). Este método consiste em dividir o dispositivo a ser analisado em um grande numero de pequenas regiões, denominadas elementos finitos. Cada elemento tem a forma de um tetraedro com quatro triângulos equilaterais. Este conjunto de tetraedros e chamado de malha (*mesh*) do elemento finito. Os valores dos campos elétricos e magnéticos nos

pontos internos a cada tetraedro são obtidos por interpolação a partir do conhecimento dos valores destes campos nas arestas do tetraedro (CARNEIRO FILHO, 2010).

2.6 Determinação dos Campos Elétricos e Magnéticos — Modo TM_{mnp}^Z

A determinação dos campos dentro da cavidade se dará através do potencial magnético vetorial. Assim, considerando os modos TM^Z , se faz necessário de imediato determinar o potencial vetorial magnético A_z , o qual deve satisfazer, em coordenadas cilíndricas, à equação de onda homogênea a seguir.

$$\nabla^2 A_z(\rho, \phi, z) + \kappa^2 A_z(\rho, \phi, z) = 0 \quad (1)$$

Nos modos TM^Z , os campos elétrico e magnético se relacionam com o potencial vetorial A_z , segundo as equações a seguir:

$$\begin{aligned} E_\rho &= -j \frac{1}{\omega \mu \epsilon} \frac{\partial^2 A_z}{\partial \rho \partial z} & H_\rho &= -\frac{1}{\mu} \frac{1}{\rho} \frac{\partial A_z}{\partial \phi} \\ E_\phi &= -j \frac{1}{\omega \mu \epsilon} \frac{\partial^2 A_z}{\partial \phi \partial z} & H_\phi &= -\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial \rho} \\ E_z &= -j \frac{1}{\omega \mu \epsilon} \left(\frac{\partial^2}{\partial z^2} + \kappa^2 \right) A_z & H_z &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

submetendo-os às seguintes condições de contorno,

$$\begin{aligned} E_\rho(0 \leq \rho' \leq a, 0 \leq \phi' \leq 2\pi, z' = 0) &= 0 \\ E_\rho(0 \leq \rho' \leq a, 0 \leq \phi' \leq 2\pi, z' = h) &= 0 \\ H_\phi(\rho' = a, 0 \leq \phi' \leq 2\pi, 0 \leq z' \leq h) &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

Assim, para os modos TM^Z , o potencial vetorial A_z é reduzido a

$$A_z = B_{mnp} J_m(\kappa_\rho \rho') [A_2 \cos(m\phi') + B_2 \sin(m\phi')] \cos(\kappa_z z') \quad (4)$$

Incluindo a equação de separação dada por:

$$(\kappa_\rho)^2 + (\kappa_z)^2 = \kappa_r^2 = \omega_r^2 \mu \epsilon \quad (4.1)$$

Os campos no interior da cavidade são representados pelas coordenadas indicadas por ρ' , ϕ' e Z' , ao passo que, $J_m(x)$ é uma função de Bessel de ordem m da primeira espécie, onde:

$$k_\rho = \chi'_{mn}/a \quad (4.2)$$

$$k_z = \frac{p\pi}{h} \quad (4.3)$$

$$m = 0, 1, 2, \dots \quad (4.4)$$

$$n = 1, 2, 3, \dots \quad (4.5)$$

$$p = 0, 1, 2, \dots \quad (4.6)$$

Na equação (4.2), χ'_{mn} representa os zeros das derivadas da função de Bessel $J_m(x)$, que externam a ordem das frequências de ressonância. Assim, os primeiros quatro valores de χ'_{mn} em ordem decrescente, estão determinados por:

$$\begin{aligned} x'_{11} &= 1,8412 \\ x'_{21} &= 3,0542 \\ x'_{01} &= 3,8318 \\ x'_{31} &= 4,2012 \end{aligned} \quad (5)$$

2.7 Frequência de Ressonância

As frequências de ressonância da antena de microfita, e, por conseguinte da cavidade, são calculadas valendo-se das equação (4.1) variando p conforme (4.6). Considerando que as antenas de microfita possuem, geralmente, substrato cuja sua espessura é pequeníssima, ou seja, $h < 0,050\lambda_0$, os campos ao longo do eixo Z não variam e são determinados por (4.6) para $p = 0$, e por (4.3), para $k_z = 0$. Logo, as frequências de ressonância para os modos TM_{mn0}^z podem ser escritas, utilizando-se de (4.1), da seguinte forma abaixo descrita,

$$(f_r)_{mn0} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} \left(\frac{\chi'_{mn}}{a} \right) \quad (6)$$

Tomando por base os valores de (5), se obtém os quatro primeiros modos em ordem crescente, a saber: $TM_{110}^z, TM_{210}^z, TM_{010}^z$ e TM_{310}^z . Neste caso, o modo dominante é o modo TM_{110}^z , e tem frequência de ressonância dada por

$$(f_r)_{110} = \frac{1,8412}{2\pi a \sqrt{\mu\epsilon}} = \frac{1,8412 v_0}{2\pi a \sqrt{\epsilon_r}} \quad (7)$$

Em que v_0 é a velocidade da luz no espaço livre.

Balanis (2009) ressalta que, a frequência de ressonância disposta em (7) não leva em consideração os efeitos de borda, para o qual, em se tratando de uma plaqueta circular, introduz-se uma correção através de um raio efetivo a_e , em substituição ao raio verdadeiro a , obtido através de:

$$a_e = a \left\{ 1 + \frac{2h}{\pi a \epsilon_r} \left[\ln \frac{\pi a}{2h} + 1,7726 \right] \right\} \quad (8)$$

Sendo assim, a frequência de ressonância descrita segundo a equação (7) para o modo dominante de propagação TM_{110}^z deve ser reescrita em termos da equação (8) adquirindo a seguinte forma:

$$(f_r)_{110} = \frac{1,8412 v_0}{2\pi a_e \sqrt{\epsilon_r}} \quad (9)$$

Quanto às densidades de correntes equivalentes, considerando o método de análise de cavidade, é possível determiná-las valendo-se do Princípio de Equivalência de Campo, em que a parede cilíndrica da cavidade é permutada por um densidade de corrente magnética equivalente ($\mathbf{M}_s = -2\hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{E}_a$). Tendo por fundamento as equações (2-4) retrodispostas e admitindo uma distribuição de campo de modo TM_{110}^z sob o *patch*, no interior da cavidade, os campos elétricos e magnéticos normalizados, podem ser escritos, considerando variações azimutais e cossenoidais, como:

$$\begin{aligned} E_\rho &= E_\phi = H_z = 0 \\ E_z &= E_0 J_1(k\rho') \cos \phi' \\ H_\rho &= j \frac{E_0}{\omega \mu_0} \frac{1}{\rho} J_1(k\rho') \sin \phi' \\ H_\phi &= j \frac{E_0}{\omega \mu_0} \frac{1}{\rho} J_1'(k\rho') \cos \phi' \end{aligned} \quad (10)$$

tal que ϕ' é o ângulo azimutal ao longo do perímetro do *patch* circular.

Desta maneira, obtendo-se o valor de E_z através da equação retromencionada na borda elétrica equivalente do disco ($\rho' = a_e$), é possível reescrever a equação para a obtenção da densidade de corrente magnética da seguinte forma:

$$\mathbf{M}_s = -2\hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{E}_{a|\rho'=a_e} = \hat{\mathbf{a}}_z 2E_0 J_1(ka_e) \cos \phi' \quad (11)$$

Levando-se em consideração que a espessura do substrato é ínfima e a densidade de corrente determinada pela equação (10), ao longo do eixo de direção z , ser constante e uniforme, torna-se possível aproximar a equação (10) para uma corrente magnética filamental da seguinte natureza

$$\mathbf{I}_m = h\mathbf{M}_s = \hat{\mathbf{a}}_\phi 2hE_0 J_1(Ka_e) \cos \phi' = \hat{\mathbf{a}}_\phi 2V_0 \cos \phi' \quad (12)$$

em que $V_0 = hE_0 J_1(Ka_e)$ em $\phi' = 0$.

Assim, utilizando a equação (11), a antena *Patch* de microfita se comportará como sendo um quadro circular, de forma que, é possível reescrever (11) em termos das equações de radiação sobre o quadro circular, as quais restam assim determinadas:

$$E_r = 0 \quad (12.a)$$

$$E_\theta = -j \frac{k_0 a_e V_0 e^{-jk_0 r}}{2r} [\cos \phi J'_{02}] \quad (12.b)$$

$$E_\phi = j \frac{k_0 a_e V_0 e^{-jk_0 r}}{2r} [\cos \theta \sin \phi J_{02}] \quad (12.c)$$

$$J'_{02} = J_0(k_0 a_e \sin \theta) - J_2(k_0 a_e \sin \theta) \quad (12.d)$$

$$J_{02} = J_0(k_0 a_e \sin \theta) + J_2(k_0 a_e \sin \theta) \quad (12.e)$$

Em que a_0 é o raio efetivo disposto em (8). Assim os campos nos principais planos redundam em:

Plano E ($\phi = 0^\circ, 180^\circ, 0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$)

$$E_\theta = j \frac{k_0 a_e V_0 e^{-jk_0 r}}{2r} [J'_{02}] \quad (13.a)$$

$$E_\phi = 0 \quad (13.b)$$

Plano H ($\phi = 90^\circ, 270^\circ, 0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$)

$$E_\theta = 0 \quad (14.a)$$

$$E_\theta = j \frac{k_0 a_e V_0 e^{-jk_0 r}}{2r} [\cos \theta J_{02}] \quad (14.b)$$

2.8 Diretividade e Condutância

Além dos parâmetros até aqui analisados, necessário se faz considerar a condutância e a diretividade. Desta forma, Balanis (2009) citando o entendimento da IEC – *International Electrotechnical Commission*, define diretividade de uma antena como sendo a razão entre a intensidade de radiação em uma determinada direção da antena e a intensidade de radiação média. Esta última intensidade consiste na potencia total radiada pela antena dividida por 4π . Ainda que a direção não seja especificada, restará implícita a máxima intensidade de radiação da antena. Assim, arrazoando, a diretividade de uma fonte não-isotrópica é igual a razão entre sua intensidade de radiação em uma certa direção e a intensidade de radiação de uma fonte isotrópica.

Traduzindo as palavras em equações matemáticas, é possível calcular a diretividade através da equação a seguir:

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (15)$$

Reiterando, quando não é especificada a direção da intensidade de radiação resta implícita a direção de máxima intensidade de radiação, ficando desta forma a diretividade expressada como:

$$D_{máx} = D_0 = \frac{U|_{máx}}{U_0} = \frac{U_{máx}}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (16)$$

onde,

D = diretividade (adimensional)

D_0 = diretividade máxima (adimensional)

U = intensidade de radiação (W/unidade de ângulo sólido)

$U_{máx}$ = máxima intensidade de radiação (W/unidade de ângulo sólido)

U_0 = intensidade de radiação de uma fonte isotrópica (W/unidade de ângulo sólido)

P_{rad} = potência radiada total (W).

É importante ressaltar que em se tratando de uma fonte isotrópica, a diretividade é unitária, já que U , $U_{máx}$ e U_0 são iguais.

Independentemente do tipo de antena e admitindo apenas a diretividade de uma fenda única ($K_0 h \ll 1$), tem-se que as equações que definem a máxima intensidade de radiação e a potência radiada restam a assim definidas:

$$U_{máx} = \frac{|V_0|^2}{2\eta_0\pi^2} \left(\frac{\pi W}{\lambda_0} \right)^2 \quad (17)$$

$$P_{rad} = \frac{|V_0|^2}{2\eta_0\pi} \int_0^\pi \left[\frac{\sin\left(\frac{k_0 W}{2} \cos \theta\right)}{\cos \theta} \right]^2 \quad (18)$$

Logo, a diretividade de uma única fenda pode ser descrita pela seguinte equação:

$$D_0 = \left(\frac{2\pi W}{\lambda_0} \right)^2 \frac{1}{I_1} \quad (19)$$

em que

$$I_1 = \int_0^\pi \left[\frac{\sin\left(\frac{k_0 W}{2} \cos \theta\right)}{\cos \theta} \right]^2 \sin^3 \theta d\theta \quad (20)$$

Quanto à condutância, ela se define como sendo o recíproco da resistência elétrica, ou seja, matematicamente, é a razão entre a intensidade de corrente e a tensão, cuja unidade de medida é o Siemes (S) que designa resistência elétrica.

Em se tratando de antenas de microfita e considerando apenas uma fenda isolada, a condutância pode ser obtida valendo-se da expressão de campo advinda da dedução do modelo da cavidade, restando assim definida:

$$G_1 = \frac{2P_{rad}}{|V_0|^2} \quad (21)$$

Ao se considerar um campo elétrico conforme descrito a seguir,

$$E_\phi \cong +j \frac{V_0 e^{-jk_0 r}}{\pi r} \left\{ \sin \theta \frac{\sin\left(\frac{k_0 W}{2} \cos \theta\right)}{\cos \theta} \right\} \quad (22)$$

tem-se que, a potência radiada resta assim descrita:

$$P_{rad} = \frac{|V_0|^2}{2\pi\eta_0} \int_0^\pi \left[\sin \theta \frac{\sin\left(\frac{k_0 W}{2}\right) \cos \theta}{\cos \theta} \right]^2 \sin^3 \theta d\theta \quad (23)$$

Então, a condutância pode ser redefinida segundo a expressão:

$$G_1 = \frac{I_1}{120\pi^2} \quad (24)$$

em que,

$$I_1 = \int_0^\pi \left[\sin \theta \frac{\sin\left(\frac{k_0 W}{2}\right) \cos \theta}{\cos \theta} \right]^2 \sin^3 \theta d\theta \quad (25)$$

Logo, em se tratando de antenas de microfita cujo *patch* seja circular, a diretividade e a condutância, considerando a potência radiada podem ser calculadas valendo-se das definições descritas em (15) e (21), de sorte que, para cada grandeza a ser obtida, necessita-se da potência radiada. Assim, considerando os campos expressos em (12.b) e (12.c) angariados por aplicação do método de análise da cavidade, tem-se que:

$$P_{rad} = |V_0|^2 \frac{(K_0 a_e)^2}{960} \int_0^{\pi/2} [J_{02}'^2 + \cos^2 \theta J_{02}^2] \sin \theta d\theta \quad (26)$$

Assim, a condutância através do através do espaçamento entre o *patch* e o plano de terra em $\phi' = 0^\circ$ pode ser escrita como

$$G_{rad} = \frac{(K_0 a_e)^2}{480} \int_0^{\pi/2} [J_{02}'^2 + \cos^2 \theta J_{02}^2] \sin \theta d\theta \quad (27)$$

2.9 Largura de Banda, Fator de Qualidade e Eficiência.

Além dos parâmetros de antenas até aqui estudados, é importante que se ressalte também o fator de qualidade, a largura de banda e a eficiência.

A largura de banda de uma antena é definida como sendo a faixa de frequências sobre a qual o desempenho da antena atende a um padrão específico, ou seja, é a faixa de frequências que vai de um lado a outro de uma frequência central, em que as características da antena como, impedância de entrada largura de feixe,

polarização, ganho, eficiência de radiação entre outros, possui valores dentro de limites aceitáveis, determinados dos valores correspondentes na frequência central (BALANIS, V. 2, 2009).

Desta forma, para antenas que possuem uma banda larga a largura de banda é costumeiramente expressa pela razão entre a frequência superior e a inferior da faixa aceitável para a operação da antena. Já para uma antena cuja banda é estreita, a largura de banda é obtida pela razão entre a diferença das frequências superior e inferior, e a frequência central (BALANIS, V. 2, 2009).

É imperioso ressaltar que, em virtude das características de uma antena não variarem necessariamente do mesmo modo com a frequência, tampouco, serem criticamente por ela afetadas, inexistente uma descrição única para a largura de banda. A situação será quem determinará as especificações, de forma a atender as necessidades da aplicação almejada (BALANIS, V. 2, 2009).

Muito embora se tenha de início explicitado o parâmetro da largura de banda é importante externar que tanto o fator de qualidade como a largura de banda e a eficiência estão inter-relacionados entre si, de sorte que inexistente liberdade plena para otimizar cada um desses parâmetros de forma singular. Ainda que se considere que determinada antena possui um ótimo desempenho, isso implicará na melhora de um parâmetro em detrimento de outro. De sorte que, há necessariamente que se otimizar, por exemplo, a largura de banda à custa de se reduzir o desempenho da eficiência ou fator de qualidade, e vice e versa.

Trazendo à análise, o fator de qualidade representa as perdas de uma antena. Especificamente, existem perdas de radiação, de condução, dielétricas e de ondas de superfície. Logo, o fator de qualidade total Q sofre influência de todas essas perdas e é, geralmente, expresso por

$$\frac{1}{Q_t} = \frac{1}{Q_{rad}} + \frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_d} + \frac{1}{Q_{sw}} \quad (28)$$

Onde

Q_t – fator de qualidade total

Q_{rad} – fator de qualidade devido às perdas de radiação

Q_c – fator de qualidade devido às perdas de condução

Q_d – fator de qualidade devido às perdas no dielétrico

Q_{sw} – fator de qualidade devido às perdas de ondas de superfície.

Vale ressaltar que em caso de substratos extremamente finos, as perdas de ondas de superfície são irrelevantes. Contudo, em se tratando de substratos espessos tais perdas devem ser consideradas.

2.10 Impedância de Entrada

A impedância de entrada de uma antena é definida como sendo a impedância apresentada pela antena em seus terminais ou a razão entre tensão e corrente em um par de terminais, ou ainda a razão entre componentes próprias de campos elétricos e magnéticos em um ponto.

Via de regra, a impedância de entrada é complexa e inclui tanto uma parte ressonante quanto outra não ressonante, a qual é costumeiramente reativa. As partes, real e imaginária, da impedância de entrada variam em função da frequência, de modo que, tanto a resistência como a reatância são simétricas em relação à frequência de ressonância. Na ressonância, a reatância é igual à média da soma de seus valores máximo (quando positivo) e mínimo (quando negativo).

Para substratos exíguos e ou delgados, extremamente finos, a reatância de alimentação se torna muito pequena quando comparada com a resistência de ressonância. Contudo, em se tratando de substratos espessos a reatância pode ser relevante, devendo ser considerada para efeitos de casamento de impedância e determinação da frequência de ressonância de um elemento com carga (Balanis, 2009).

2.11 Polarização

Segundo Balanis, a polarização de uma antena em uma determinada direção é definida como a polarização de onda transmitida (radiada) por esta mesma antena. Reitera o referido autor que, se a direção não for especificada a polarização é referida à direção de ganho máximo. Praticamente, a polarização da energia radiada sofre variação

com a direção do centro da antena, de forma que partes do diagrama podem ter polarizações diferentes (BALANIS, V. 2, 2009).

Existem três espécies de polarização, a saber, a linear, a circular e a elíptica. Assim, se o vetor campo elétrico em certo ponto no espaço, em função do tempo, estiver direcionando ao longo de uma linha reta, o campo está linearmente polarizado. Geralmente, a figura que descreve o campo elétrico é uma elipse e o campo é dito elipticamente polarizado. As polarizações linear e circular são casos particulares da polarização elíptica, podendo serem obtidas quando a elipse tornar-se uma linha reta ou um círculo.

O campo elétrico poderá traçar uma curva no sentido horário ou anti-horário. Logo, a rotação do campo elétrico no sentido horário é designada como polarização à direita, e o sentido anti-horário é dita polarização à esquerda.

As características de polarização de uma antena são representadas por seu diagrama de polarização o qual é definido como a distribuição espacial das polarizações de um vetor de campo excitado pela antena, sendo a distribuição tomada sobre a esfera de polarização (BALANIS, V. 2, 2009).

É de bom ressaltar, independentemente do formato do *patch* nas antenas de microfita, eles radiarão, sobretudo, ondas que possuam polarização linear, desde que seja usada alimentação convencional desprovida de modulação. No entanto, considerando as polarizações nas espécies circular e elíptica, elas poderão ser obtidas valendo-se de pequenas mudanças nos elementos de *patch* ou de diversas configurações de alimentação da antena.

Para uma plaqueta circular, a polarização para o modo de transmissão TM_{110}^z é obtida utilizando dois alimentadores com separação angular adequada. A figura abaixo demonstra uma antena de plaqueta circular excitada por dois alimentadores coaxiais distando 90° .

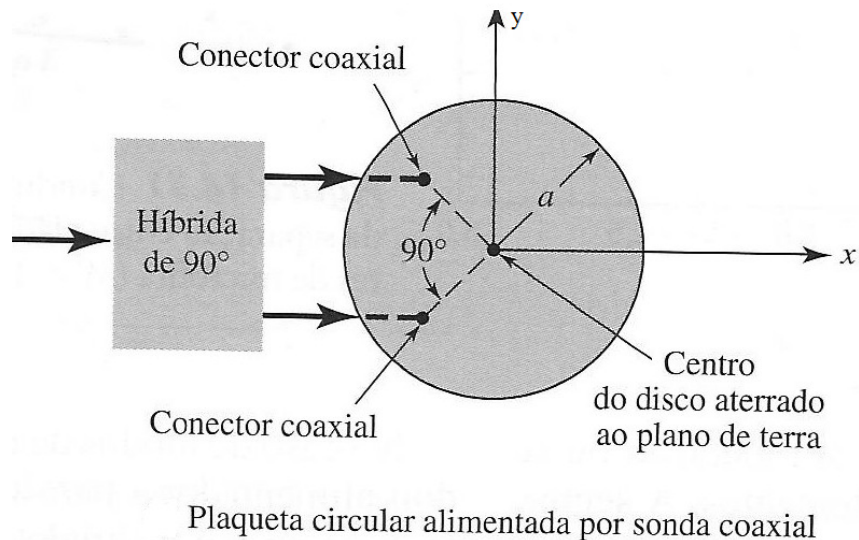


Figura 17 – *Patch* circular – alimentação por sonda coaxial.

Fonte: Balanis (2009).

Esses dois alimentadores coaxiais geram campos que são ortogonais entre si tanto abaixo como fora da plaqueta. Vale ressaltar que, para tal configuração as sondas coaxiais são posicionadas, uma em relação à outra, de modo que o campo gerado pela outra sonda seja nulo, não havendo muito acoplamento mútuo entre os dois alimentadores coaxiais. Em busca dessa polarização circular, ainda se faz necessário que as duas ondas sejam excitadas de modo a existir uma defasagem temporal de 90° entre seus respectivos campos. Tal artifício é conseguido fazendo-se usos de uma híbrida de 90° como restou demonstrado.

Desta maneira, o aterramento se opera posicionando o pino de terra no centro do *patch*, conectando-o ao plano de terra. A necessidade disso está em obter-se a polarização circular. Porém, prioritariamente, busca-se suprimir com isso os modos que não exibem variações em ϕ , e, conseqüentemente, melhorar a qualidade da polarização circular (BALANIS, V. 2, 2009). Para situações que envolvam modos de transmissão de ordens superiores, a separação angular entre os alimentadores coaxiais necessariamente é diferente.

A polarização circular também pode ser obtida apenas com um alimentador coaxial. Tal intento se consegue alimentando-se a plaqueta em um único ponto com o objetivo de excitar dois modos ortogonais degenerados com mesma frequência de ressonância e de amplitudes idealmente iguais. Logo, ao introduzir uma assimetria adequada na cavidade a degenerescência tende a ser removida. Um dos modos tem sua

frequência de ressonância acrescida e o modo ortogonal diminuída no mesmo montante. Passando agora os dois modos a possuírem frequências de ressonâncias diferentes, adequando o projeto, o campo de um modo pode ser adiantado em 45° e o outro retardado de 45° , resultando numa defasagem de 90° exigida pela polarização circular.

Uma vez abordado todo suporte teórico que suportará, não só a confecção de uma antena de plaqueta, a partir da fabricação do substrato de Pentóxido de Nióbio (Nb_2O_5), através da metalurgia do pó, mas também, viabilizará a realização de medições com a finalidade de se auferir parâmetros das antenas de microfita que a caracterizam, aqui, teoricamente apresentados, dentre os quais serão medidos a impedância de entrada e a perda de retorno, frequência de ressonância e largura de banda.

Cumpra agora externar a fabricação da antena de microfita que se inicia com a escolha da matéria prima para a constituição do substrato, que no caso do presente trabalho, é o Pentóxido de Nióbio (Nb_2O_5). Em seguida buscar-se-á a caracterização elétrica do substrato (analisar somente as características elétricas do material), de modo que, dar-se-á relevância a tal caracterização do substrato obtido que consistirá na aferição da permissividade elétrica relativa (ϵ_r) e tangente de perdas ($\tan \delta$), objetivando detectar a sua viabilidade técnica de funcionar com propriedades dielétricas, para a partir de então, através da metalização dispor o *patch* sobre o substrato obtido, confeccionar a antena de plaqueta e efetuar simulações através de softwares comerciais, no caso, o *Ansoft HFSS®*.

3 Antenas *Patch* de Microfita desenvolvida sobre Substrato a base de Pentóxido de Nióbio – Nb₂O₅.

Uma antena de microfita, como a mostrada e definida anteriormente, consiste de uma superfície metálica bem fina, assentada sobre um substrato dielétrico de pequena espessura disposto sobre um plano terra. A antena de microfita é desenvolvida para que sua irradiação máxima seja normal a sua superfície. Isto pode ser alcançado através de uma escolha apropriada do modo de excitação (configuração do campo) embaixo da antena.

Como o substrato consiste em um material dielétrico disposto entre a plaqueta de microfita e o plano de terra cumpre estudar os seus parâmetros para poder se tecer uma classificação de tais materiais dielétricos, no que tange a sua capacidade de se comportar como tal, sobretudo, em relação ao elemento radiante da antena de microfita.

Devido à facilidade de análise e de fabricação, sem prescindir de suas atraentes características de radiação, especialmente baixa radiação de polarização cruzada, o presente trabalho objetiva desenvolver antenas de microfita no formato circular valendo-se para tanto da constituição de substratos a partir do *Pentóxido de Nióbio* (Nb₂O₅). Considerando tal intento, projetos similares foram encontrados, desenvolvendo antenas de microfita disposta em um substrato do tipo cerâmico.

De início, Girão (2012), em trabalho dissertativo, valeu-se de Caulim, Quartzo e Feldspato Sódico na elaboração de um suporte cerâmico, submetendo tal substrato a testes e análises para caracterizá-lo mineralogicamente, mecanicamente, fisicamente e, sobretudo, eletricamente segundo a sua resistividade (ρ) e constante dielétrica (K).

O processo de desenvolvimento do suporte cerâmico é constituído de três fases assim dispostas como identificação e caracterização da matéria prima, preparação da matéria prima através da secagem e mistura e preparação das amostras procedendo com a compactação e secagem ou sinterização dos corpos cerâmicos. Em seguida proceder-se-á com a caracterização mineralógica, física, mecânica e elétrica do substrato cerâmico obtido, conforme fluxograma da Figura 18 a seguir.

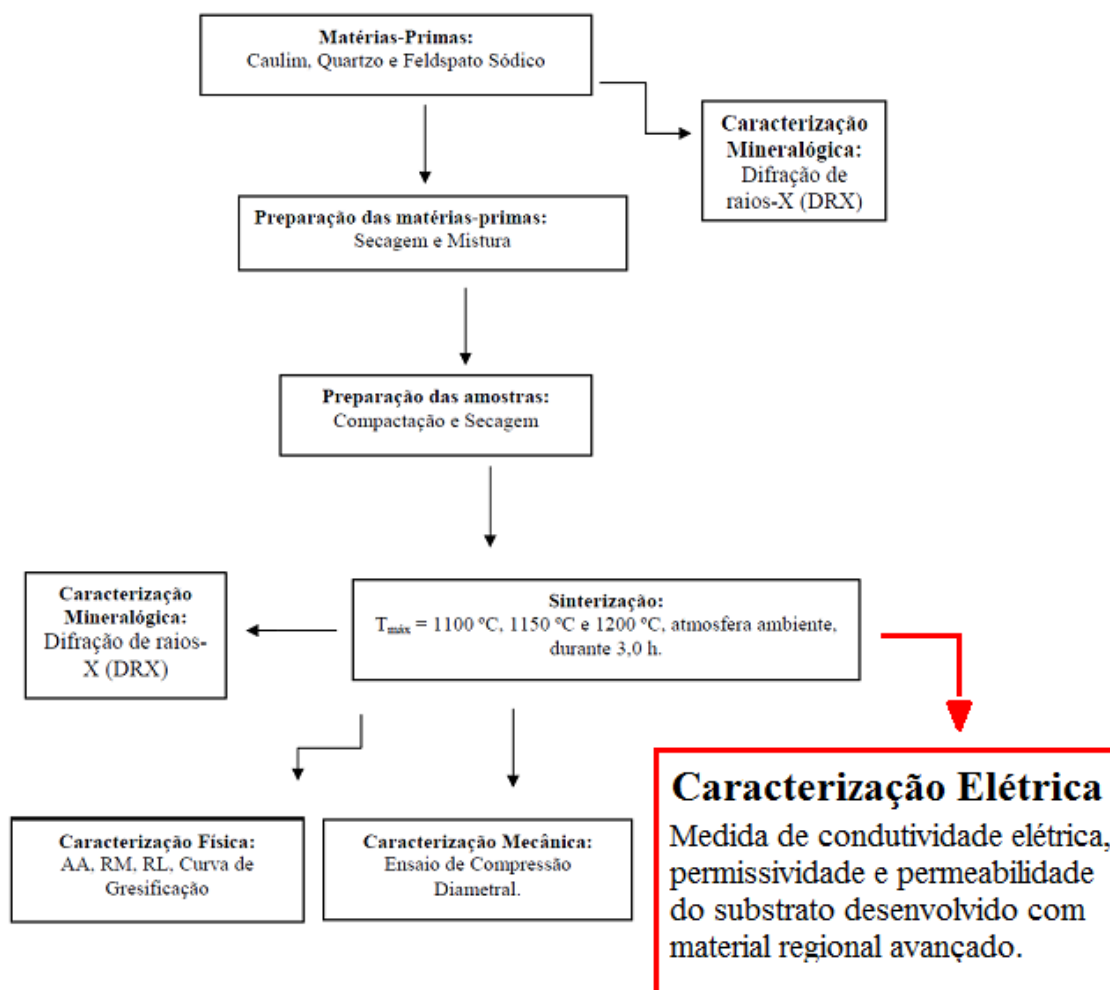


Figura 18 – Fluxograma de Etapas de confecção do substrato cerâmico

Fonte: Girão (2012), adaptada.

Outro trabalho consistiu na elaboração de substrato cerâmico Niobato de Bismuto – $BiNbO_4$ para antenas de microfita de sistemas de comunicações sem fio desenvolvido por CARNEIRO FILHO (2010). O referido autor projetou e usou substratos dielétricos cerâmicos de alta permissividade elétrica usando o Niobato de Bismuto ($BiNbO_4$) dopado com Pentóxido de Vanádio (V_2O_5). Os substratos foram utilizados na construção de antenas *patch* de microfita para operar na faixa de frequências de microondas, e, restritamente, em frequências na faixa compreendida entre 2,5 GHz e 3,0 GHz.

O uso de substratos cerâmicos com alta permissividade elétrica relativa é de grande importância na construção de dispositivos de microondas, pois proporcionam uma redução nas dimensões destes dispositivos. Por sua vez, as baixas perdas dielétricas acarretam um aumento na largura de banda da antena.

Conforme assevera Carneiro Filho (2010) as características básicas dos ressoadores dielétricos cerâmicos usados nas frequências de microondas consiste num alto valor da permissividade elétrica relativa, ϵ_r , a maior dimensão de uma antena, e diretamente proporcional ao comprimento de onda de operação no ressoador dielétrico, λ_D . O valor do comprimento de onda no ressoador dielétrico, que não exhibe propriedades magnéticas, é proporcional ao valor do comprimento de onda no espaço livre, λ_0 , multiplicado pelo inverso da raiz quadrada da permissividade elétrica relativa, ou seja: $\lambda_D = \lambda_0 / (\epsilon_r)^{1/2}$.

Assim, quanto maior a permissividade elétrica relativa menor o comprimento de onda de operação e consequentemente menor a dimensão da antena; além de um alto fator de qualidade, Q , para assegurar a seletividade da frequência de ressonância, permitindo a redução de ruídos e interferências, deve-se ter para o fator de qualidade de um ressoador dielétrico um valor $Q > 1000$. O fator de qualidade de um ressoador dielétrico é o inverso de suas perdas dielétricas, caracterizada pela tangente de perdas, $\tan \delta$, ou seja: $Q = 1 / \tan \delta$. Portanto, em um ressoador dielétrico com baixas perdas dielétricas deve-se ter um valor da tangente de perdas tal que $\tan \delta < 10^{-3}$, e por fim, um baixo valor do coeficiente de variação da temperatura na frequência de ressonância, $F\tau$, haja vista a estabilidade térmica da frequência assegurar a confiabilidade do componente, mesmo quando sujeito as variações da temperatura de operação. Portanto, um material que apresente baixo coeficiente de variação da temperatura na frequência de ressonância, proporciona a manutenção da eficiência da antena com relação as mudanças na temperatura do meio ambiente. O material cerâmico niobato de bismuto possui um patamar médio para este coeficiente da ordem de $F\tau \approx 50 \text{ ppm} / C^\circ$ (CARNEIRO FILHO, 2010).

Como o substrato consiste em um material dielétrico disposto entre a plaqueta de microfita e o plano de terra se faz necessário estudar os seus parâmetros para poder se tecer uma classificação de tais materiais dielétricos, no que tange a sua capacidade de se comportar como condutor ou dielétrico.

Nesse entendimento Carneiro Filho (2010) escreve que as grandezas físicas que caracterizam os materiais com aplicações em eletromagnetismo são: a permissividade elétrica, ϵ ; a condutividade elétrica, σ e a permeabilidade magnética, μ . Nos substratos dielétricos considerados perfeitamente isolantes, não exibindo propriedades magnéticas,

tem-se que a permeabilidade magnética relativa vale $\mu_r \approx 1$, de forma que a permeabilidade magnética fica dada por: $\mu = \mu_r \mu_0 = \mu_0$. Já a permissividade elétrica é dada por $\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0$, onde ε_r é denominada permissividade elétrica relativa do meio. O termo μ_0 é a permeabilidade magnética do vácuo, com valor dado por: $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ e o termo ε_0 é a permissividade elétrica no vácuo dada por: $\varepsilon_0 = 8,8542 \times 10^{-12} \text{ F/m}$. Os materiais, ou meios, são então classificados de acordo com estas características elétricas como sendo: dielétricos sem perdas, dielétricos com perdas, semicondutores, bons condutores ou condutores perfeitos.

Vale ressaltar que um meio pode ser dielétrico, em previsão de certa faixa de frequência, ou condutor para uma outra faixa. De sorte que, a frequência é um fator preponderante na classificação de um meio dielétrico ou condutor.

O presente trabalho valeu-se do Pentóxido de Níbio (Nb_2O_5) para elaborar um substrato que atenda as características operacionais na faixa de frequência de microondas, passando pelas seguintes fases de constituição, a saber: maceração ou moagem através de um moinho de bolas, prensagem e sinterização.

No entanto, é importante ressaltar que, mesmo sem prescindir das fases que constituem a metalurgia do pó retrocitadas, o Pentóxido de Níbio (Nb_2O_5) já fora cedido pela empresa (nome da empresa) em forma de pó, de modo que foi desnecessária a maceração e a moagem, passando-se ato contínuo a proceder com a prensagem e sinterização para a confecção de diversas amostras de substratos em virtude de se variar, não somente a pressão de compactação, mas também a temperatura de sinterização.

3.1 O Pentóxido de Níbio

A descoberta do Níbio (Nb) se deu na Inglaterra, no princípio do século passado, por Charles Hatchett. O seu nome originou-se de uma homenagem à América, de onde adveio o mineral, do qual o metal foi separado e denominado por ele como Columbium (SILVA, 2001).

O Níbio (Nb) ou Colômbio (Cb) é um elemento metálico de número atômico 41 na Tabela Periódica dos Elementos Químicos. Sua massa específica é de $8,57 \text{ g/cm}^3$,

pouco superior à do ferro, e seu ponto de fusão é de 2.468° C. À temperatura ambiente resiste bem à ação de ácidos clorídrico (até 35%), sulfúrico (até 95%), nítrico concentrado, fosfórico, crômico, acético, fórmico e cítrico. Possui baixa resistência à oxidação e tem a propriedade da supercondutividade em temperaturas inferiores à -264° C (SILVA, 2001).

A partir de 1932, o ferro-nióbio vem sendo utilizado com o objetivo de melhorar a qualidade dos aços e, como carboneto, é utilizado para a fabricação de ferramentas de corte rápido. No final da última guerra mundial o nióbio começou a ter emprego em propulsores a jato. O Governo dos Estados Unidos, reconhecendo a sua relevância, fez grandes compras de minerais de Nióbio e Tântalo, para garantir o suprimento de eventuais demandas (SILVA, 2001).

O nióbio e o tântalo se apresentam naturalmente juntos, porquanto possuem propriedades análogas, em que o nióbio tem densidade igual a 8,57 g/cm³ e o Tântalo igual a 16,60 g/cm³. Os minerais principais que os constituem são as columbitas-tantalitas, formando uma série isomorfa de nióbio-tantalatos de ferro e manganês, apresentando teores variados de pentóxido de nióbio (Nb₂O₅) e de pentóxido de tântalo (Ta₂O₅). São chamados de columbitas os minerais com predominância de nióbio, e tantalitas aqueles em que predomina o tântalo, não havendo, todavia, limites precisos para esta definição. As columbitas e tantalitas são minerais de ambientes pegmatíticos, confundindo-se com magnetita, ilmenita e cassiterita pela cor negra e o brilho semelhante. O Pegmatito, pegmatite ou pegmatita, é a designação dada a uma rocha ígnea de grão grosseiro em o que o tamanho dos grãos (minerais) é igual ou maior que 20 mm. Diz-se que estas rochas apresentam *textura pegmatítica* (SILVA, 2001).



Figura 19 – Pegmatito composto de feldspato alterado e cristais azuis de corindo (maciço alcalino de Canaã, Rio de Janeiro, Brasil).

Fonte: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Pegmatito> (19/08/2014, 10h26min)

A principal aplicação do nióbio se dá nos aços de baixa liga e alta resistência (HSLA), na fabricação de tubulações de grandes diâmetros, a serem utilizados na construção civil, em obras de grande porte e na indústria automobilística.

A liga ferro-nióbio, obtida através do processo de aluminotermia (Aproveitamento do intenso poder redutor do alumínio para obtenção de metais. Por outras palavras, o processo aluminotérmico consiste na redução dos óxidos metálicos a partir do alumínio para a obtenção dos respectivos metais), é um importante insumo empregado na obtenção de alguns tipos de aços, como os microligados e inoxidáveis, com aplicação nas indústrias de construção civil, automotiva, naval, aeronáutica, espacial, na fabricação de tubulações (grades, estruturas, gasodutos e oleodutos) e de ferramentas de alta precisão (SILVA, 2001).

Nos aços microligas, mesmo com um reduzido consumo específico, cerca de 400g de FeNb por tonelada de aço, o Nióbio confere ao produto características de elevada resistência mecânica, tenacidade e soldabilidade. Nos inoxidáveis a sua importância consiste em neutralizar o efeito do carbono e do nitrogênio, afastando assim o risco de deterioração do produto por corrosão (SILVA, 2001).

O óxido de nióbio, que representa 13% do mercado mundial da substância, contém 99% de Pentóxido de Nióbio – Nb_2O_5 e é a matéria-prima utilizada para obtenção de produtos de terceira geração: níquel-nióbio, ferro-nióbio de alta pureza, óxidos especiais de nióbio (grau ótico e grau cristal) e nióbio metálico. A maior parte da produção de óxido de nióbio é destinada à indústria de superligas, na produção de supercondutores de energia, indústria aeronáutica, dispositivos eletrônicos, capacitores cerâmicos, indústria aeroespacial e indústria ótica (Silva, 2001). Em previsão de tais características o presente trabalho pretende demonstrar a viabilidade do Pentóxido de Nióbio como matéria prima para a fabricação de substrato a serem utilizados na constituição de antenas com *patch* no formato circular de microfita, fabricando uma antena com esse substrato que operacionalize na faixa de microondas.

Em alguma combinação de pressão de compactação com temperatura de sinterização, as propriedades do Nb_2O_5 são mais próximas das ideais para produção de substratos de antenas de microfita, processados via metalurgia do pó, quais sejam:

permissividade elétrica de média para alta, tangente de perdas inferior a 0,001 e mínimas variações percentuais mássicas e dimensionais. O nióbio não possui qualquer função biológica conhecida, apesar de o corpo humano apresentar quantidades mensuráveis (aproximadamente 1,5 mg) (SOUZA et al. 2014).

Um estudo teórico, com base na eletronegatividade dos elementos Nióbio (Nb) e Oxigênio (O), mostrou que as ligações químicas do Pentóxido de Nióbio (Nb_2O_5) são ligações covalentes polares. A existência de dipolos no interior desse material indica sua dieletricidade. Outros estudos recentes usam o Pentóxido de Nióbio – Nb_2O_5 como um dos componentes para produzir substratos para as antenas de microfita e afirmam que essa é uma alternativa melhor do que o Pentóxido de Tântalo (Ta_2O_5) para tal aplicação, já que a primeira apresenta menor temperatura de sinterização do que a última. Contudo, nenhum deles usa unicamente esse material, como uma opção para produzir tais substratos (SOUZA, 2014).

Na virada do milênio o Brasil detinha cerca de 92,4%, o equivalente a 33.998 t, da produção mundial de Nb_2O_5 , mantendo a liderança, não só na produção, mas também na oferta do Nióbio no cenário mundial. Em 2007, o Brasil torna-se detentor de cerca de 98% do Nióbio (Nb) existente, seguido pelo Canadá (1,5%) e Austrália (0,5%); sendo também o maior produtor mundial da substância, representando 96,6% do total mundial, concentrando no Estado de Minas Gerais a maior oferta (90%), seguido pelo Estado de Goiás (10%). e exporta aproximadamente 95% do que produz. Desta forma, se faz notório que o país não possui uma tecnologia capaz de processar tal matéria prima e proporcionar uma aplicação para esse elemento dentro do território nacional. Um estudo teórico mostrou a possibilidade do uso do Pentóxido de Nióbio (Nb_2O_5) como material para produção de substratos de antenas de microfita (CALLISTER JR., 2007).

Assim, de posse do pó de Pentóxido de Nióbio (Nb_2O_5), que foi cedido pela Companhia Brasileira de Mineração e Mineralogia (CBMM), SOUZA (2014) procedeu com a prensagem e sinterização para a confecção de diversas amostras de substratos em virtude de se variar, não somente a pressão de compactação, mas também a temperatura de sinterização. Foram produzidos substratos em diversas pressões de prensagem e diversas temperaturas de sinterização, sendo realizadas medidas de caracterização química, mecânica e caracterização elétrica (obtendo valores médios da permissividade elétrica e da tangente de perdas). Por conseguinte, analisou-se, experimentalmente, a

possibilidade do uso desse material para a fabricação de substratos de antenas de microfita.

Este trabalho deu continuidade aos estudos produzindo antenas de microfita com propriedades melhoradas e a utilização de substratos dielétricos cujas propriedades mecânicas, elétricas, químicas e físicas foram especificadas. Escolheu-se, para o projeto, o substrato produzido com as melhores características obtidas por SOUZA (2014) com pressões e temperaturas variadas.

Usando esse processo, foram feitos experimentos preliminares nos laboratórios de Engenharias I da UFERSA, com pressões de compactação de 111.02 MPa (1 tonelada) e temperatura de sinterização em 1.100°C (como norteiam as atuais referências). Esta etapa foi realizada por Souza (2014) no laboratório de Ensaios Mecânicos sob a supervisão e orientação do Prof. Manoel Quirino da Silva Júnior do curso de Engenharia Mecânica.

3.2 Fases da Confecção do Substrato Cerâmico e da Antena de Microfita

A) Fase da Moagem

Muito embora já se tenha obtido o Pentóxido de Níbio (Nb_2O_5) na forma de pó segue a explicação do processo de moagem, a qual se dará fazendo uso de um moinho de bolas de baixas energias. Tais moinhos são constituídos por um cilindro oco, de metal, com um eixo disposto horizontalmente, no qual se imprime um movimento de rotação.

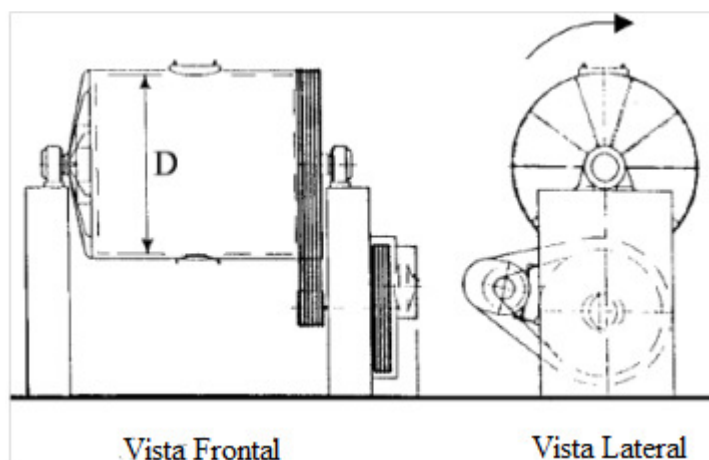


Figura 20 – Moinho de bolas de baixas energias.

Fonte: Ribeiro e Abrantes (2001)



Figura 21 – Moinho de bolas

Fonte: Girão (2012).

Após a moagem o material seguirá para a segunda fase, no caso a prensagem.

B) Fase da Prensagem

Na fase da prensagem, para se dar forma ao material, primeiramente, a amostra da massa medida é colocada no interior de uma matriz em aço ferramenta, apresentada na Figura 4. Esta matriz foi especificamente projetada e construída para moldar os substratos com a geometria adequada às dimensões das antenas de microfita propostas, para que estas antenas pudessem funcionar na faixa de frequências de comunicações sem fio. Uso-se uma prensa Ribeiro com capacidade máxima de 30 toneladas, cuja imagem é e mostrada na Figura 4(b). Depois de ser prensado, o substrato em forma de disco (pastilha) e retirado da matriz em aço ferramenta.



Figura 22(a) – Matriz em aço ferramenta

Figura 22 (b) – Prensa de compactação

Fonte: Carneiro Filho (2010).

C) Fase da Sinterização

Após a prensagem material já no formato de pastilha circular, será submetido a um aquecimento de elevada temperatura (A temperatura de sinterização dos substratos cerâmicos pode variar de aproximadamente 800 C° a 1.600 C°, com um período de 1 hora até 12 horas) durante um determinado intervalo de tempo. A finalidade deste processo de aquecimento, denominado sinterização, consiste em acelerar a difusão dos átomos constituintes do material sobre a superfície das partículas. A relevância do processo de sinterização está em promover as ligações das partículas adjacentes aumentando sua resistência mecânica. Os vazios, também chamados de poros do material, são eliminados ocorrendo um aumento na densidade do material. Usou-se para esta fase um forno mufla fabricado pela empresa Jung.



Figura 23 – Forno mufla fabricado pela Jung.

Fonte: <http://www.jung.com.br/>

Após estas etapas, buscou-se caracterizar o material dielétrico através de seus parâmetros elétricos, dentre os quais estão permissividade elétrica(ϵ) e tangente de perdas ($\tan \delta$), objetivando detectar a sua viabilidade técnica de funcionar com propriedades dielétricas, para a partir de então, através da metalização dispor o *patch* sobre o substrato obtido, confeccionar a antena de microfita e efetuar simulações através de softwares comerciais, no caso, o *Ansoft HFSS®*. A etapa de caracterização foi realizada no laboratório de Telecomunicações da UFRN, junto ao Prof. Ronaldo de Andrade Martins, do curso de Engenharia Elétrica.

D) Fase de Caracterização Elétrica

Com o intuito de aferir a permissividade elétrica e a tangente de perdas as amostras de substrato confeccionadas a variadas pressões de compactação e a diversas temperaturas de sinterização foram inseridos em um *gap* no interior de um guia de ondas WR-90 (0,9" x 0,4" – 22,86mm x 10,16mm) para frequências de 8,2 GHz a 12,4 GHz (banda X) e submetidas, no interior do guia, a incidência de ondas eletromagnéticas em uma faixa de frequência de 8.2 GHz a 12.4GHz, imposta pelo guia de ondas. Efetuando-se as medições através do Analisador de Redes Vetorial da Rohde Schwartz, modelo ZVB14, conforme mostrado pela figura a seguir.



Figura – 24: Analisador de Redes Vetorial da Rohde Schwartz, modelo ZVB14 caracterizando eletricamente o substrato a base de Pentóxido de Nióbio – Nb_2O_5 .
Medições da Permissividade Elétrica (ϵ_r) e Tangente de perdas ($\tan \delta$).

Fonte: Autoria Própria

A amostra produzida por uma pressão de compactação de 11,02 MPa (1 ton) e submetida a uma temperatura de sinterização de 1.100° C nos ofereceu uma permissividade elétrica de aproximadamente $\epsilon = 3.5 F/m$ e tangente de perdas muito próxima de zero.

E) Fase do processo de Metalização

Para a metalização do substrato dielétrico a base de Pentóxido de Nióbio – Nb_2O_5 pode-se fazer uso da cola condutiva em prata. Onde as placas metálicas são fixadas ao substrato através de secagem em um forno à temperatura de $180\text{ }^\circ\text{C}$ durante certo intervalo de tempo (CARNEIRO FILHO, 2010).

Para a confecção da antena de microfita pretendida para presente trabalho se utilizou uma lâmina de cobre que foi recortada nas dimensões e forma circulares e foram coladas de modo a se conformar às medidas do substrato dielétrico de Pentóxido de Nióbio – Nb_2O_5 , conforme se auferiu observando o produto final, ou seja, a antena de microfita com *patch* circular, na figura abaixo.



Figura 25 – Antena de Microfita com *Patch* na forma circular disposta sobre o substrato dielétrico a base de Pentóxido de Nióbio – Nb_2O_5 .

Fonte: Autoria própria.

Desta maneira, a antena de microfita disposta na Figura – 27, foi construída com uma espessura de substrato $h = 3\text{mm}$ e diâmetro 15mm. Para o *Patch*, este fora obtido de uma placa de cobre com espessura de 0,05mm a qual recortada no formato circular, alcançou um diâmetro de 5mm. A linha de microfita de alimentação foi constituída com um largura de 1,78mm e um comprimento de 2.88mm.

O projeto foi realizado pelo método analítico da cavidade, fazendo-se uso da equação (8) para calcular o valor do raio efetivo a_e e, substituindo-o na equação (9) para obter-se a frequência de ressonância f_{rc} para o modo de propagação dominante.

Assim tem-se que, substituindo-se o valor de $\epsilon_r = 3.5$ e $a = 2.5mm$, bem como o valor da espessura do substrato $h = 3mm$, calculou-se o valor do raio efetivo do *Patch*:

$$a_e = a \left\{ 1 + \frac{2h}{\pi a \epsilon_r} \left[\ln \frac{\pi a}{2h} + 1.7726 \right] \right\}$$

$$a_e = 2.5 \times \left\{ 1 + \frac{2 \times 3}{\pi \times 2.5 \times 3.5} \left[\ln \frac{\pi \times 2.5}{2 \times 3} + 1.7726 \right] \right\}$$

$$a_e = 3.6141907mm$$

Substituindo-se o raio efetivo calculado acima na equação abaixo, obter-se-á a frequência de ressonância para o modo de propagação dominante como assim se procede abaixo.

$$(f_r)_{110} = \frac{1.8412 \times 3 \times 10^9}{2 \times \pi \times 6.22 \times \sqrt{3.5}}$$

$$(f_r)_{110} = 6.50835349GHz$$

E para o segundo modo:

$$(f_r)_{210} = \frac{3.0542 \times 3 \times 10^9}{2 \times \pi \times 6.22 \times \sqrt{3.5}}$$

$$(f_r)_{210} = 10.79611840GHz$$

O método da cavidade é um modelo aproximado de análise para se obter uma primeira aproximação dos valores de frequência de ressonância e das dimensões das antenas. Após a metalização com o desenvolvimento da antena se procedeu com os testes para mensurar os parâmetros pertinentes às antenas discretas.

4 Antenas *Patch* de Microfita desenvolvida sobre substrato a base de Pentóxido de Nióbio – Nb₂O₅, simulações, medições e resultados.

Tendo produzido o substrato dielétrico, fazendo uso da matéria prima Pentóxido de Nióbio – Nb₂O₅, e dispondo o adesivo circular (*patch*) sobre o referido suporte a antena de microfita foi desenvolvida e procedeu-se com os testes e simulações visando caracterizá-la segundo os parâmetros à ela iminentes. Tal caracterização se deu pela realização de avaliações da antena se comportando como receptora, ou transmissora, culminando assim com a mensuração de seus parâmetros característicos através de simulações realizadas por meio de softwares comerciais, no caso, o *Ansoft HFSS®*.

Dentre os parâmetros das antenas de microfita, que as caracterizam, foram medidos a impedância de entrada, a perda de retorno, frequência de ressonância e largura de banda.

4.1 As Simulações

Para realizar as simulações se fez uso do *software* comercial *Ansoft HFSS®* (*High Frequency Structure Simulator*). Através do referido programa projetou-se a antena alimentando-a com os referidos dados a saber: substrato dielétrico com uma espessura de $h = 3 \text{ mm}$ e diâmetro 15 mm. Para o *Patch*, este fora disposto no formato circular, alcançando um diâmetro de 5 mm e 0,05 mm de espessura. A linha de fita de alimentação fora constituída com um largura de 1,78 mm e um comprimento de 5 mm aproximadamente, valores com os quais se confeccionou a antena de microfita objetivo principal do presente trabalho.

A simulação da antena com um software adequado permite verificar o funcionamento da antena antes da mesma ser construída, Com isso pode-se fazer ajustes necessários, aproximando a antena a ser construída do que se deseja. Uma vez confeccionada a antena com as dimensões sobreditas foram feitas as devidas medições para comparação com os resultados das simulações. Com a simulação, foi obtido o gráfico da perda de retorno em dB, em relação a frequência de operação em GHz, da antena simulada via *Ansoft HFSS®*.

Do gráfico em análise se depreende que uma das frequências em que a antena ressoou foi de 10,6890 GHz. Tal resultado não só evidencia a capacidade da antena de operacionalizar em tal frequência, porquanto dentro da faixa de microondas, mas

também externa a viabilidade técnica do Pentóxido de Nióbio – Nb_2O_5 em funcionar como um substrato dielétrico na confecção de antenas discretas de microfita. A viabilidade se torna patente quando se compara os resultados medidos com os resultados simulados.

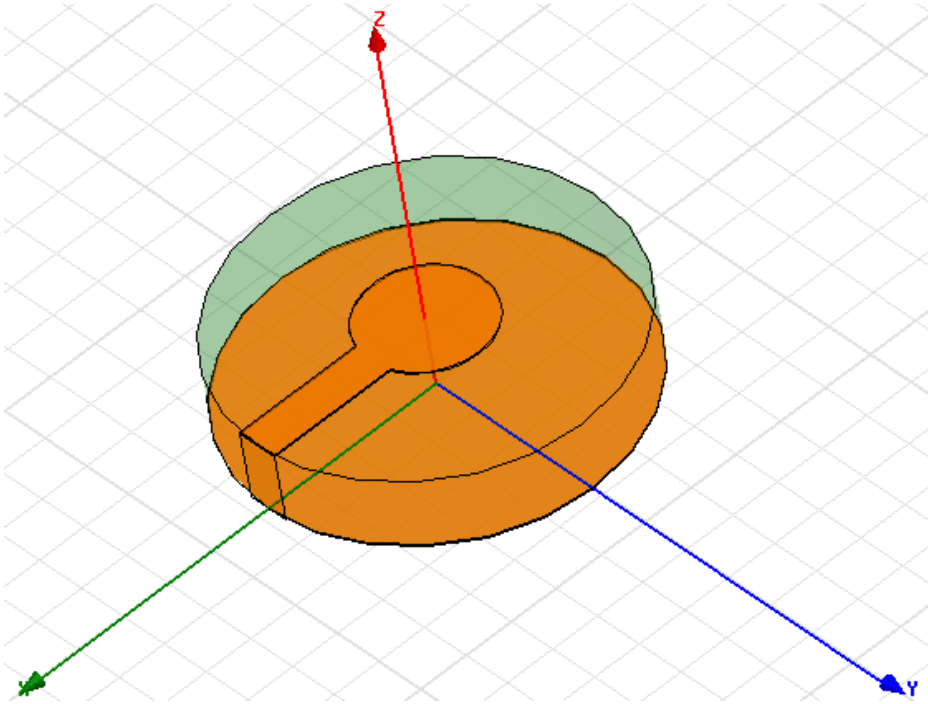


Figura 26 – Antena de Microfita Circular projetada no HFSS

Fonte: Gerada pelo Ansoft *HFSS*®.

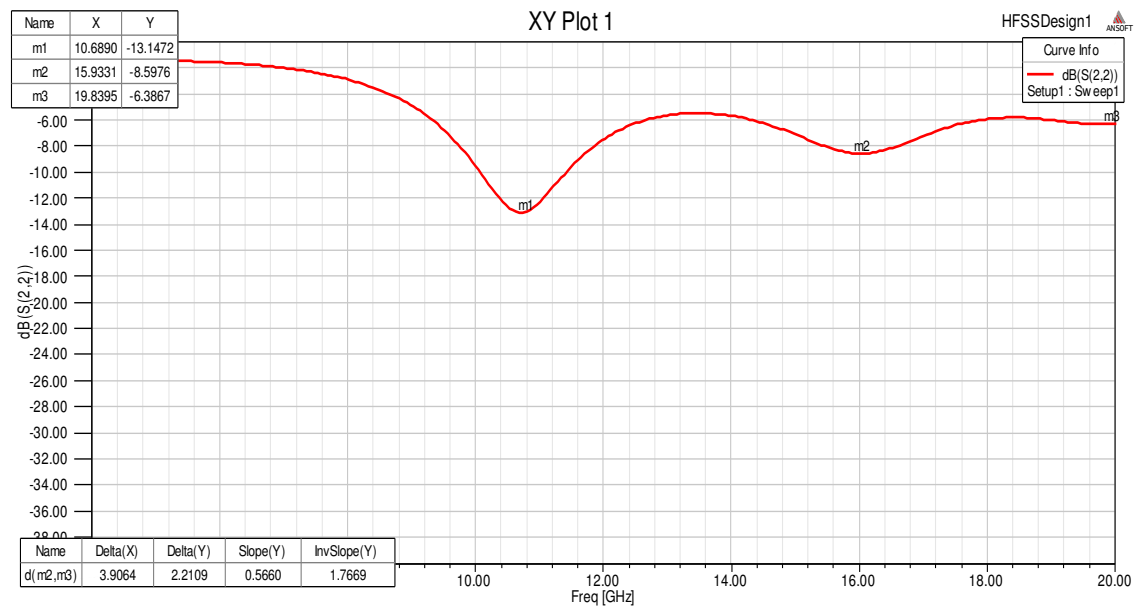


Figura 27 – Gráfico do ganho da antena simulada em razão da frequência de operação.

Fonte: Gerada pelo Ansoft *HFSS*®.

Logo, a antena discreta construída, como objetivo primordial do presente trabalho funciona e ressoa perfeitamente para a frequência pretendida, ou seja, dentro da faixa de microondas, comprovando a viabilidade técnica do material cerâmico Pentóxido de Níbio – Nb_2O_5 em ser utilizado como matéria prima na elaboração de substrato dielétrico para a fabricação de antenas de microfita.

Conforme as Figuras 28 e 29, a seguir, demonstra-se a capacidade da antena de radiar, conforme esperado para um diagrama de radiação de antenas discretas, direcionalmente em um plano normal a outro, para o qual ele não radia do mesmo modo, comportando-se como uma antena omnidirecional, uma característica típica das antenas de microfita.

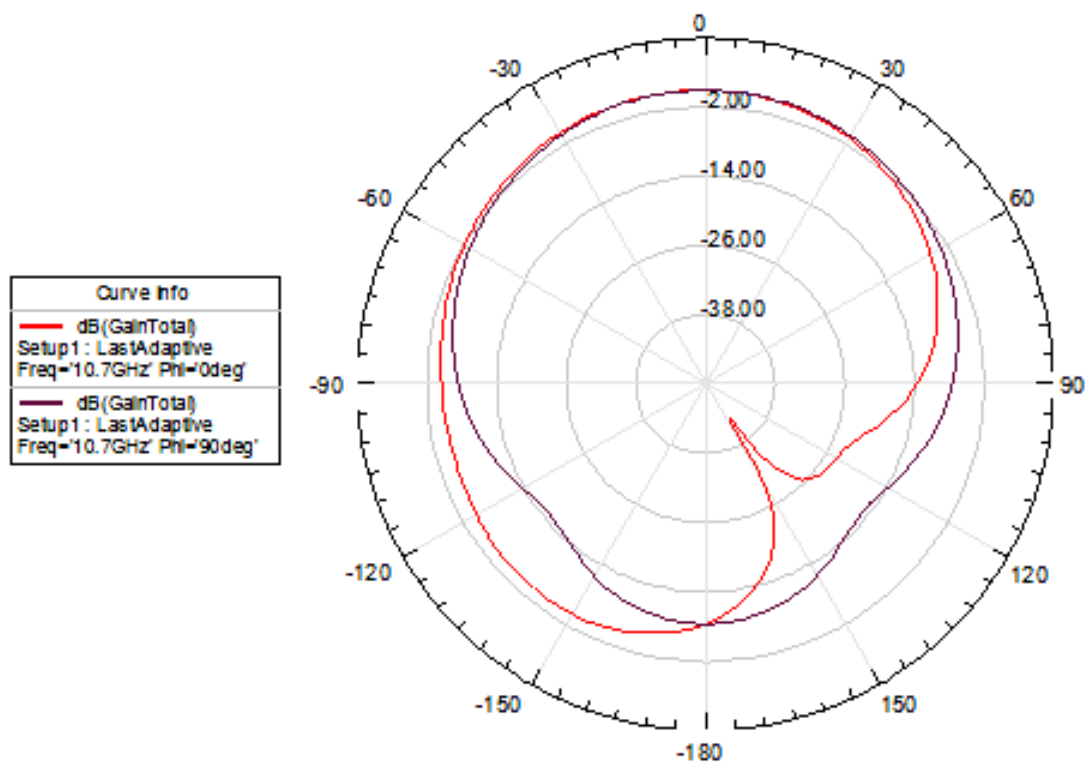


Figura 28 – Diagrama de radiação em 2D da antena simulada

Fonte: Gerada pelo Ansoft *HFSS*®.

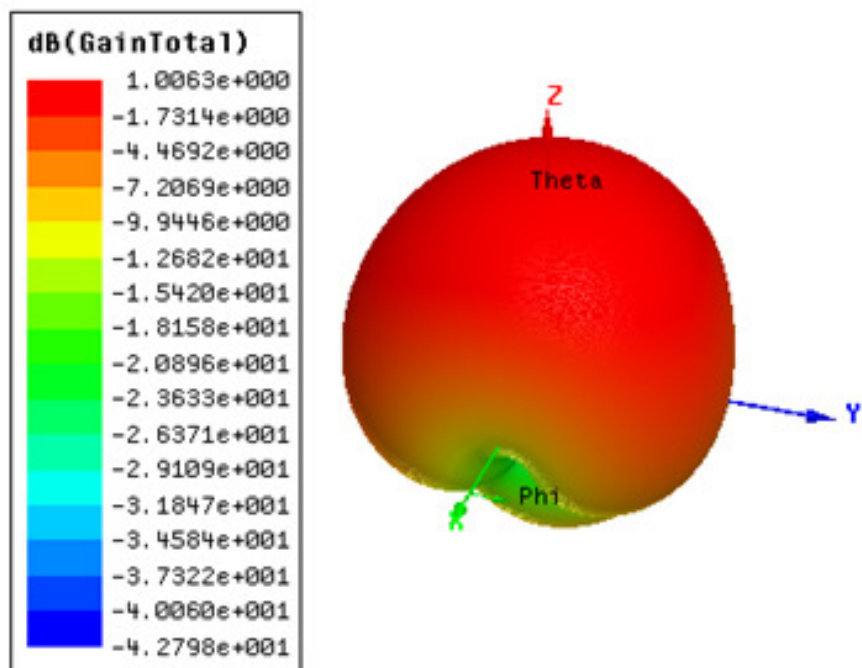


Figura 29 – Diagrama de radiação em 3D da antenna simulada

Fonte: Gerada pelo Ansoft *HFSS*®.

Assim, de acordo com o que se percebe dos diagramas de radiação em 2D e 3D como resultados provenientes da simulação da antenna discreta construída, ela ressoa na frequência de operação em torno de 10, com maior intensidade em apenas uma direção conforme se espera para uma radiação padrão das antenas *Patch* de microfita.

No que atine a densidade de corrente, a intensidade de corrente se concentra na borda da plaqueta, com se observa na Figura 31 a seguir.

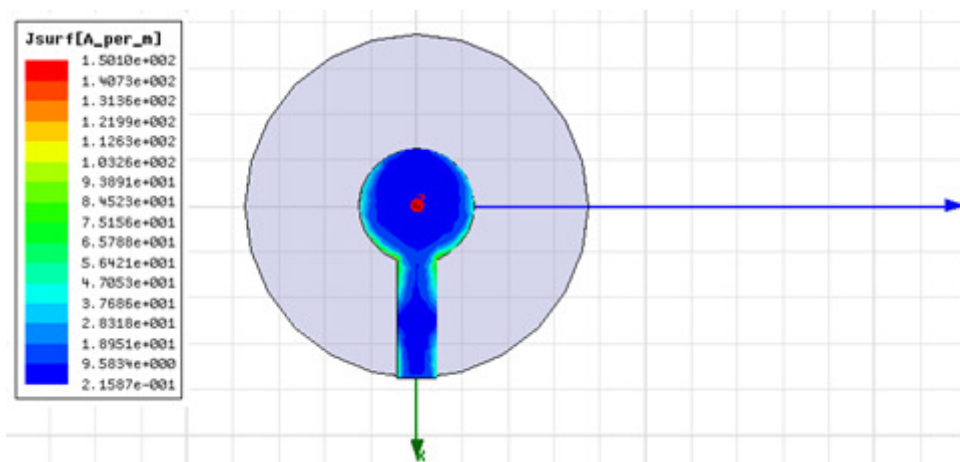


Figura 30 – Densidades de correntes e campos radiados da antenna simulada.

Fonte: Gerada pelo Ansoft *HFSS*®.

Tal resultado advindo da simulação é precisamente o que se espera para o parâmetro de densidade corrente/intensidade de corrente para antenas discretas de microfitas.

4.2 As Medições

De posse das amostras do material cerâmico a base de Pentóxido de Nióbio – Nb_2O_5 , fazendo uso de um analisador de redes vetorial, conforme disposto na Figura a seguir, se procedeu com as medições a partir da caracterização elétrica do mencionado material do extraindo então os parâmetros da permissividade elétrica relativa (ϵ_r) e tangente de perdas ($\tan \delta$), conforme se depreende da Figura 25. Passou-se a medir as propriedades de antenas, conforme mostra a Figura a seguir.

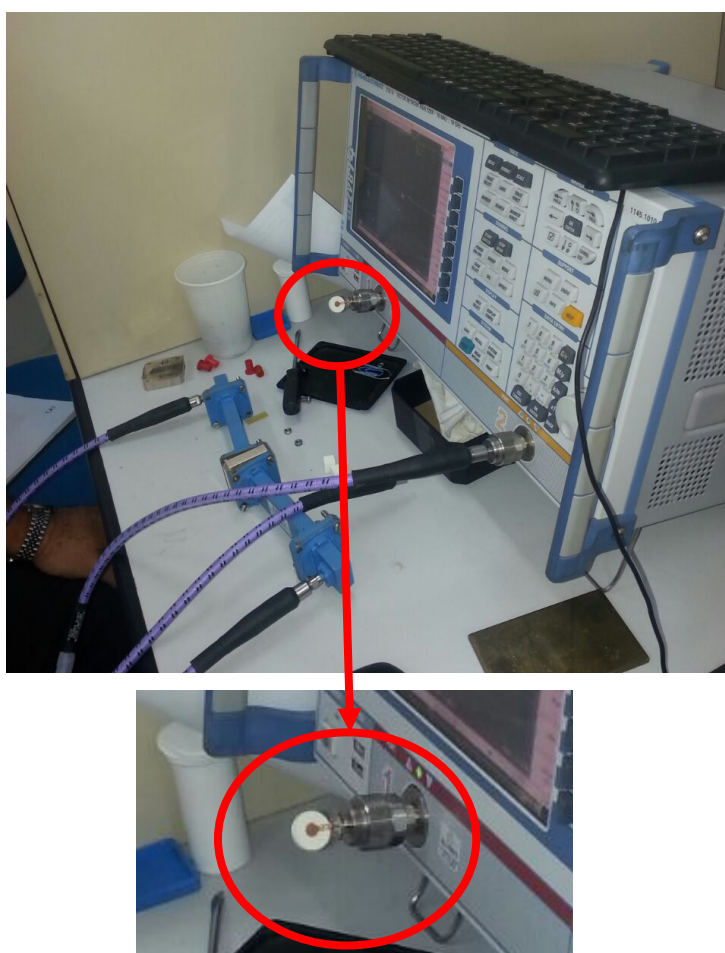


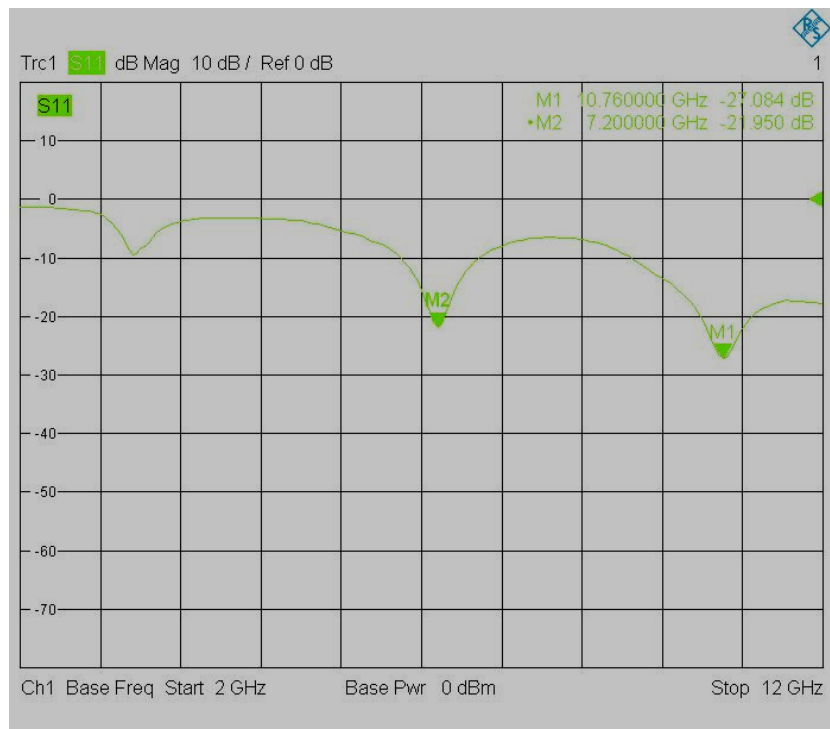
Figura 31 – Analisador de Redes Vetorial da Rohde Schwartz, modelo ZVB14 medindo as propriedades da antena produzida.

Fonte: Autoria própria

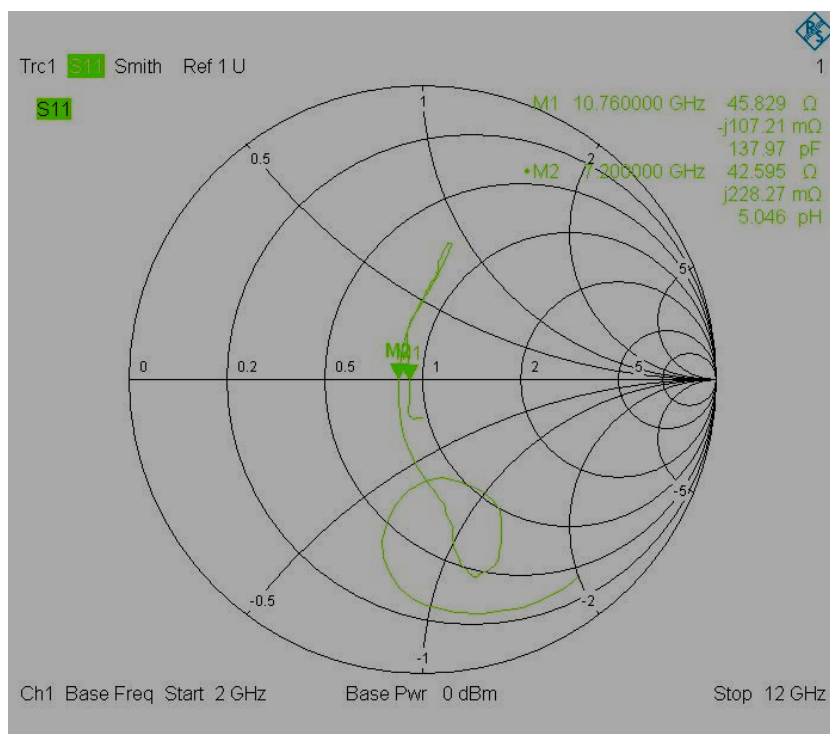
Assim, conforme se percebe na teoria substratos que possuem permissividade elétrica relativamente baixa se adequam perfeitamente à confecção de antenas discretas por permitirem uma maior eficiência, maior largura de banda e campos mais desprendidos, contribuindo de forma facilitada a radiação no espaço livre (Balanis, 2009). No que pertine à frequência de operação em torno de 10GHz, ela foi escolhida em virtude de se perceber, através da observação das medidas, que para um $\epsilon_r=3,5$ tem-se uma tangente de perdas aproximadamente em torno de zero.

Doravante, fazendo uso de tais parâmetros, utilizando um substrato (a base de Pentóxido de Níbio – Nb_2O_5) no formato circular com espessura de três milímetros ($h = 3\text{ mm}$) e lançando mão como instrumento teórico do método analítico da cavidade, e com o cálculo do raio efetivo e da frequência de ressonância com o intuito de projetar a antena pretendida. Obteve-se os valores para o raio do *Patch* de $a = 5\text{ mm}$ e da frequência de ressonância $f_r = 8.720651\text{ GHz}$. A espessura de substrato $h = 3\text{ mm}$ e diâmetro 15 mm do substrato foi escolhido, porém poderia ser alterado com facilidade apenas trocando-se o pastilhador e a quantidade de material usado na produção do substrato. O *patch* foi confeccionado de uma placa de cobre com espessura de 0,05 mm. A linha de microfita de alimentação foi constituída com um largura de 1,78 mm e um comprimento de 2.88 mm.

As medidas de propriedades de antenas foram feita com o mesmo analisador de redes vetorial que as medidas de características elétricas do substrato, porém a faixa de frequência foi de 2GHz a 12 GHz, pois não havia a limitação do guia de ondas. Observando a carta de Smith, obtida destas medidas na Figura 32(b), extrai-se que a antena ressoa na frequência de 10,76GHz, com uma impedância de $45,829-j\ 107,21\text{ m}\Omega$ (137,97 pF), e para a outra frequência de ressonância de 7,2GHz com uma impedância de $42,595+j228,27\text{ m}\Omega$ (5,046 pH). As frequências de 7,2 GHz e 10,76 GHz tiveram uma perda de retorno de 20,958 dB e 27,084 dB, respectivamente, mostrando que a antena ressoa nestas frequências, conforme Figura 32 a seguir.



(a)



(b)

Figura 32 – Medidas realizadas no Analisador de Redes Vetorial da Rohde Schwartz,
(a) perda de retorno e (b) Carta de Smith

Fonte: Gerada pelo Analisador de Redes.

É de relevância ressaltar que, em atenção à Figura 32(b), para substratos exíguos a parte imaginária que compõe a impedância de entrada tende a zero, sendo desprezível. Contudo, para substratos espessos a impedância reativa, ou seja, a reatância indutiva (quando positiva) ou capacitiva (quando negativa) é considerada para efeitos de casamento de impedância. Antes de tudo é imprescindível externar que a resistência (parte real), em ambas as impedâncias de entrada de cada frequência de ressonância para as quais a antena confeccionada ressoa, ficou próximo do valor teórico esperado para as antenas discretas. Tudo conforme se depreende da Figura acima demonstrada.

Portanto, em razão do que anteriormente se explanou, constata-se a viabilidade técnica do Pentóxido de Nióbio em funcionar como substrato dielétrico cerâmico na confecção de antenas de plaqueta.

A Figura 33 a seguir une o resultado para perda de retorno simulado via *Ansoft HFSS®* com o resultado obtido na mensuração feita por meio do Analisador de Redes.

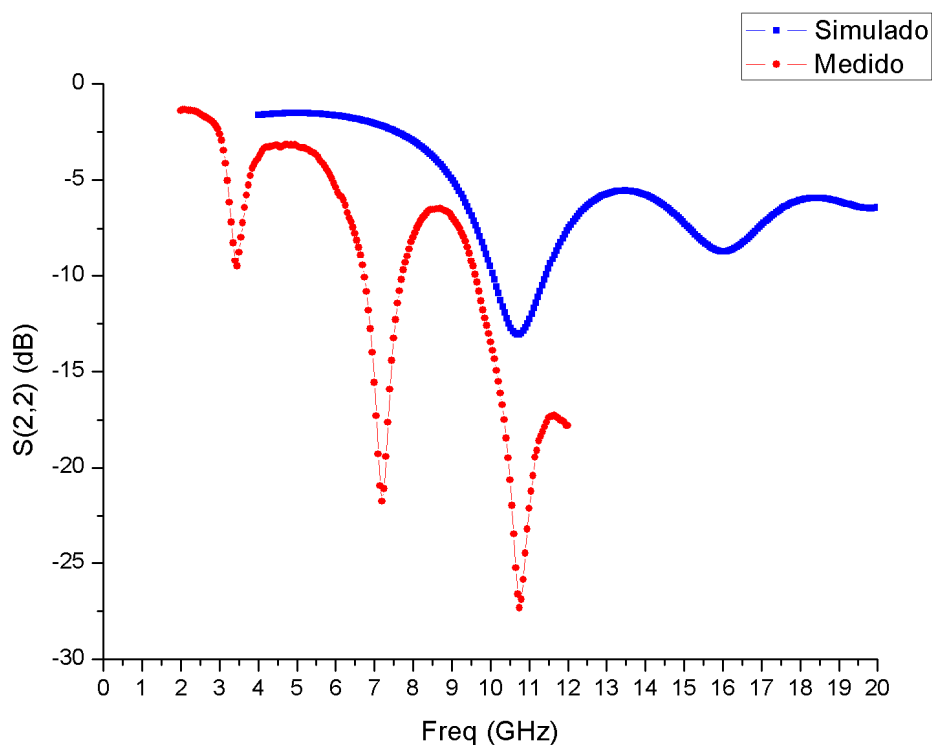


Figura 33 – Curva de perda de retorno simulada e mensurada.

Fonte: Autoria própria.

Da Figura 33 acima se verifica que tanto para a simulação quanto para medição a antena confeccionada ressoou em torno de 10,75 GHz, constatação essa que reforça a viabilidade técnica do Pentóxido de Níbio – Nb_2O_5 em funcionar como substrato dielétrico cerâmico na confecção de antenas *patch* de microfita, vez que, o resultado medido está conforme o simulado.

5. Análise Conclusiva

No presente trabalho, foram realizados o projeto, a construção, a simulação e a medição de parâmetros da antena *patch* (na forma circular) de microfita confeccionada sobre substrato cerâmico no formato circular, utilizando como matéria prima o material cerâmico Pentóxido de Níbio – Nb_2O_5 . Os resultados alcançados tanto nas simulações como nas medições apresentaram uma boa concordância. A antena confeccionada ressoou próximo à frequência de operação de 10GHz, em torno da qual se fundou todo projeto. Os resultados foram considerados satisfatórios em virtude da concordância observada entre os valores dos parâmetros medidos e simulados para a antena sob análise.

A vantagem de se usar o material cerâmico Pentóxido de Níbio – Nb_2O_5 reside no fato do referido material ser encontrado em larga escala no Brasil, e com grande valor agregado após o beneficiamento. É um material simples de se obter, com baixo valor de permissividade elétrica, e, conforme se percebe na teoria substratos que possuem constante dielétrica, ou seja, permissividade elétrica relativamente baixa se adéqua perfeitamente à confecção de antenas discretas por permitirem uma maior eficiência, maior largura de banda e campos mais desprendidos, contribuindo de forma facilitada a radiação no espaço livre. Não obstante, usou-se uma temperatura de sinterização em torno de 1100°C, que qualquer forno tipo mufla atinge. Ademais, a técnica usada para a produção da pastilha possibilita a confecção de múltiplas camadas, facilitando a produção de pastilhas em variadas dimensões, conforme especificações de projeto, em um único dispositivo. Não bastasse isso, ainda permite a integração de elementos passivos como filtros e antenas.

No projeto dos substratos dielétricos utilizando o material cerâmico Pentóxido de Níbio – Nb_2O_5 foram realizadas simulações o *Ansoft HFSS®*, visando à otimização da antena *patch* de microfita metalizada sobre o material cerâmico de baixa permissividade elétrica. Contudo, as medições dos parâmetros da antena foram realizadas no analisador de Redes Vetorial da Rohde Schwartz, modelo ZVB14. A validação dos resultados das medições dos parâmetros das antenas *patch* de microfita também foram realizadas através de simulações no *Ansoft HFSS*. A frequência de operação da antena confeccionada foi de 10,76GHz, ou seja, aproximadamente igual ao resultado obtido para a frequência de ressonância simulada que foi de 10,88GHz.

O valor da permissividade elétrica relativa do material Pentóxido de Nióbio – Nb_2O_5 obtido através de medições foi $\epsilon_r = 3,5$ com tangente de perdas próximo a zero. Este valor está na faixa especificada na literatura, com valores entre $2,2 \leq \epsilon_r \leq 12$. A antena confeccionada apresentou resultados medidos e simulados para a frequência de operação com boa concordância.

A contribuição mais importante deste trabalho diz respeito ao uso de novos materiais na construção de antenas de microfita utilizando materiais cerâmicos abundantes no Brasil e a aplicação de técnicas advindas da ciência dos materiais. Os procedimentos gerais podem ser estendidos a quaisquer materiais cerâmicos e outras configurações de antenas, incluindo os compostos magnéticos. Outros dispositivos de microondas como ressoadores dielétricos e filtros podem ser projetados e construídos usando a mesma técnica.

Como trabalhos futuros se propõem, para a melhoria do substrato, a utilização de fundentes para melhorar as propriedades mecânicas, aumentar a permissividade elétrica, reduzir a temperatura de sinterização, e para melhorar as propriedades da antena, propõe-se o uso de multicamadas, que são fáceis de obter com as técnicas estudadas.

6. Referências

ALKA, V., **Analysis and Design of Circular Microstrip Antenna in X band** in Technical Journals Online.com – IJAERS/Vol. I/ Issue III/April-June, 2012/93-94.

BALANIS C.A. **Teoria das antenas: análise e síntese**, Volume 2, Rio de Janeiro: LTC, 2009.

BALANIS, C.A. **Teoria das antenas: análise e síntese**, Volume 1, Rio de Janeiro: LTC, 2009.

BALANIS, C.A., **Modern antenna handbook**, Wiley, 2008.

BORDIGNON, P.; CARNEIRO, T.; TAGUSAGAWA, S.; HULKA, K. **Uses and End Users of Niobium** in CBMM. <http://www.cbmm.com.br/portug/capitulos/uses/use&user.htm>, acessado em 09/12/2013 22:53.

CALLISTER JR. W.D. **Materials Science and Engineering: an Introduction**. 7th. ed. New York: John Wiley & Sons, 2007.

CARNEIRO FILHO, R. **Desenvolvimento de Substrato Cerâmico $BiNbO_4$ para Antenas de Microfita de Sistemas de Comunicações Sem Fio**, Tese de Doutorado UFRN, Natal, RN, 2010.

CARVER K.R. e MINK J.w.. **Microstrip Antenna Technology**, in IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION, VOL. 29, NO. 1, JANUARY 1981.

GIRÃO, K.D. **Estudo Sobre Constante Dielétrica Relativa e Módulo de Young de Cerâmica do Sistema Caulim-Feldspato Sódico-Quartzo**, dissertação de mestrado, UERN, Mossoró, RN, 2012.

GUHA D. **Resonant Frequency of Circular Microstrip Antennas with and Without Air Gaps**, in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 49, no. 1, january 2001.

HUSSAIN A., YAWER A. e MOHAMMED A.A.A., **Bandwidth Enhancement of Circular Microstrip Antennas**, in ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, VOL. 5, Nº. 1, JANUARY 2010.

JAMES, J. R. and HALL, P. S. **J.R. Introdução – Historical development and future prospects** – in Handbook of Microstrip Antennas, Volume 1, Cap. 1; Published by: Peter Peregrinus Ltd., London, United Kingdom 1989; Peter Peregrinus Ltd.

KISHK A. A., e SHAFI L.. **The Effect of Various Parameters of Circular Microstrip Antennas on Their Radiation Efficiency and the Mode Excitation**, in

IEEE Transactions on Antennas and Propagation, VOL. AP-34, N°. 8, AUGUST 1986.

KUMAR, G. e Ray K.P. **Broadband microstrip antennas**, Artech Editora, 2003
KWAHA B. J., INYANG O.N E AMALU P. **The Circular Microstrip Patch Antenna – Design and Implementation in IJRRAS** 8 (1), www.arpapress.com/Volumes/Vol8Issue1/IJRRAS_8_1_11.pdf, july 2011.

MACIEL D.C.M. **Utilização do Programa Mathematica® no Ensino de Antenas de Microfita**. In XXXIII – Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia – COBENGE

MISHRA A., JANVALE G. B., PAWAR B.V., PATIL P. M., **The Design of Circular Microstrip Patch Antenna by Using Quasi-Newton Algorithm of ANN**, in J. Electromagnetic Analysis & Applications, 2010, 2, 444-449, Published Online July 2010 (<http://www.SciRP.org/journal/jemaa>).

MORAIS J.H.C. **Estudos de Antenas Patches de Microfita Miniaturizadas em Banda Larga para Aplicação em dispositivos móveis e portáteis**, Dissertação de Mestrado, UFRN – Natal/RN, 2011.

NÓBREGA, C.L. **Otimização dos Parâmetros de Monopolos Planares para Aplicações em Sistemas de Banda Ultralarga**, Dissertação de Mestrado, UFRN, Natal, RN, 2008.

POZAR, D.M. **Microwave engineering**, Wiley, 2011.

PRASAD T.D., KUMAR K.V.S., MUINUDDIN M.D.K., KANTHAMMA C.B. e KUMAR V.S.. **Comparisons of Circular and Rectangular Microstrip Patch Antennas**, in International Journal of Communication Engineering Applications-IJCEA, Vol 02, Issue 04; July 2011.

SCHAUBERT D.H., POZAR D.M. e ADRIAN A. **Effect of Microstrip Antenna Substrate Thickness and Permittivity: Comparison of Theories with Experiment** in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 31, n°. 6, june 1989.

SHAFI, L. e KISHK, A.A. **Analysis of circular microstrip antennas – in Handbook of Microstrip Antennas**, Volume 1, Cap. 2; Published by: Peter Peregrinus Ltd., London, United Kingdom 1989; Peter Peregrinus Ltd.

SILVA, C. S. **Nióbio – Balanço Mineral Brasileiro**, DNPM, 2001.

SONALI J. e NEMA R. **Review Paper for Circular Microstrip Patch Antenna**, In International Journal of Computer Technology and Electronics Engineering (IJCTEE) Volume 1, Issue 3

SOUZA, D., FRAGA, F.E.N. e QUEIRÓZ JR, I.S. **Influence of Compacting Pressure in the Mechanical and Physical Properties of Niobium Pentoxide to Apply in Microstrip Antennas**, in CONGRESSO IBERO-AMERICANO DE SUPERFÍCIE, MATERIAIS E APLICAÇÕES DE VÁCUO – ICSMVA, Natal, RN, 2014.

SURESH J.V. RATNESH N.A. KRISHNA. S.R.K, YOGESH L., BABU B.A. e KUMAR K.V.V. **Design of Far-Field Focusing Circular Patch Antenna at 5.8GHZ for RFID Applications**, *in* Journal of Engineering Research and Applications (IJERA) ISSN: 2248-9622 www.ijera.com Vol. 2, Issue 2, Mar-Apr 2012, pp.640-644.

VERMA A.K. e NASIMUDDIN. **Analysis of Circular Microstrip Antenna on Thick Substrate**, *in* Journal of Microwaves and Optoelectronics, Vol. 2, N.o 5, July 2002.

VILLEGAS R. R. and RUVALCABA I. U. **Metodología de Diseño para Antenas Microcinta de Parche Rectangular**. Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica - Zacatecas, Zac., Agosto de 2010.

YARMA B.S. **Design of Ultra Wideband Antenna Matching Networks**. Springer Science+Business Media B.V. 2008.