

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



Universidade Federal
de Campina Grande

CAMILA CAROLINE RODRIGUES DE ALBUQUERQUE

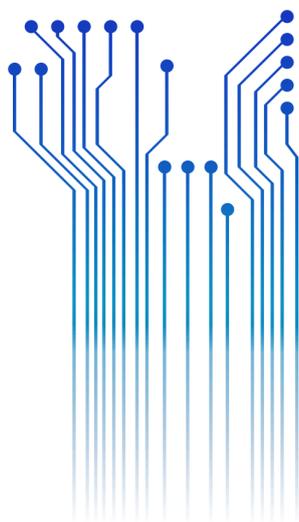


Centro de Engenharia
Elétrica e Informática

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
CONCEPÇÃO DE ANTENA DE POLARIZAÇÃO CIRCULAR PARA APLICAÇÕES EM
SISTEMAS DE IDENTIFICAÇÃO POR RADIOFREQUÊNCIA



Departamento de
Engenharia Elétrica



Campina Grande
2018

CAMILA CAROLINE RODRIGUES DE ALBUQUERQUE

CONCEPÇÃO DE ANTENA DE POLARIZAÇÃO CIRCULAR PARA APLICAÇÕES EM SISTEMAS DE
IDENTIFICAÇÃO POR RADIOFREQUÊNCIA

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

Área de Concentração: Telecomunicações

Orientador:

Alexandre Jean René Serres, D. Sc.

Campina Grande
2018

CAMILA CAROLINE RODRIGUES DE ALBUQUERQUE

CONCEPÇÃO DE ANTENA DE POLARIZAÇÃO CIRCULAR PARA APLICAÇÕES EM SISTEMAS DE
IDENTIFICAÇÃO POR RADIOFREQUÊNCIA

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

Área de Concentração: Telecomunicações

Aprovado em / /

Professor Avaliador
Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

Alexandre Jean René Serres, D. Sc.
Universidade Federal de Campina Grande
Orientador, UFCG

Dedico este trabalho a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para que eu chegasse até aqui.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, pela minha vida, por me abençoar sempre, por me manter sempre positiva e por nunca me deixar desistir.

Aos meus pais, Marilane e Marcos, que sempre foram meu porto seguro, sempre me apoiaram e me incentivaram a seguir meus sonhos. Eles, que sempre tiveram orgulho de quem sou e do que faço, foram e sempre serão os principais alicerces para eu ser quem sou hoje e ter alcançado tudo que já tenho em todos os aspectos da minha vida. Muito obrigada por sempre serem fortes e unidos diante das inúmeras reviravoltas que passamos nas nossas vidas e por sempre me fazer sentir especial e amada, vocês são a melhor parte de mim e me ensinaram tudo que tenho orgulho de ser hoje.

Ao meu namorado, Alessandro, por sempre estar do meu lado, por ser meu companheiro de todas as horas, meu confidente, e por acreditar em mim e me fazer sentir a pessoa mais inteligente do mundo mesmo quando eu estava desacreditada. Além disso, por ser meu refúgio nas horas de desespero, que houveram bastantes ao longo do curso. Eu te amo.

Aos meus amigos e colegas, pelo companheirismo, pelos ensinamentos, pelas risadas entre aulas e pelos sofrimentos compartilhados. Em especial, aos membros do Capítulo IEEE de Antenas e Propagação da UFCG que em tão pouco tempo se tornaram como uma pequena família dentro da universidade para mim. Também gostaria de agradecer aos funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica da UFCG pelo trabalho incessante para nos ajudar sempre que possível, pela paciência, pela dedicação e pela paixão com que parecem realizar suas tarefas, meu muitíssimo obrigado.

Ao meu orientador, Professor Alexandre Serres, por todas as oportunidades e orientações concedidas ao longo desses últimos anos, agradeço pela amizade, por estar sempre disposto a ajudar e por ter confiado no meu potencial para desenvolver todos os projetos que realizamos juntos.

Finalmente, a todos que, de alguma maneira, contribuíram para que eu chegasse até esse momento da minha vida e por me tornar quem sou hoje.

“Intelligence is the ability to adapt to change.”

Stephen Hawking.

RESUMO

A tecnologia de identificação por radiofrequência (RFID) já é bastante popular nas aplicações comerciais e vem passando por uma evolução com a introdução do conceito de Internet das Coisas nos sistemas existentes. Com isto, a necessidade por elementos mais eficientes e mais robustos para atender a estes novos requisitos é cada vez maior. Assim, um dos principais problemas nos sistemas RFID é a correta identificação das etiquetas utilizadas em aplicações nas quais não é possível prever o alinhamento entre as estas e as antenas. Com o propósito de evitar esse tipo de situação, as antenas de polarização circular se apresentam como uma opção bastante confiável. Assim, este trabalho propõe o *design* de uma antena de polarização circular de baixo custo para sistemas RFID operando na frequência UHF americana de 915MHz. Inicialmente, foi feito um estudo teórico sobre antenas, em seguida, foi proposto um modelo, que, posteriormente, foi fabricado utilizando o FR4 como substrato. A antena produzida foi então testada e foi validado seu funcionamento tanto em relação aos resultados obtidos em simulação como em comparação aos obtidos para uma antena comercial.

Palavras-chave: RFID, antenas, polarização circular, UHF.

ABSTRACT

The radiofrequency identification (RFID) technology is very popular in commercial applications and it is experiencing an evolution with the insertion of Internet of Things concepts into its existing systems. So, the need for more efficient and more robust elements for corresponding to those new demands is increasing. One of the main concerns in the RFID systems is the correct identification of the tags in applications where it isn't possible to predict the alignment between the tags and the antennas. With the purpose of avoiding this kind of situation, the circular polarized antennas are suggested as a reliable option. In this context, this work presents the design of a low-cost circular polarized antenna for RFID systems operation in the American UHF frequency of 915MHz. Initially, it's was made a study of antenna theory and then it was proposed a design, which was manufactured using FR4 as the substrate. The antenna produced was then tested and its performance was validated both in relation to the results obtained in simulation as in comparison to those obtained for a commercial antenna.

Keywords: RFID, antennas, circular polarization, UHF.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Diagrama de irradiação de uma antena	15
Figura 2 - Exemplo de diretividade de uma antena	16
Figura 3 - Relação entre ganho e diretividade	18
Figura 4 - Polarização de antenas	19
Figura 5 - Parâmetros S	21
Figura 6 - Sistema RFID.....	22
Figura 7 - Antena proposta	23
Figura 8 - Valores de a) ganho e b) S11 para a antena com a espessura $h = 1,52\text{mm}$. ..	23
Figura 9 - Valores de a) ganho e b) S11 para a antena com a espessura $h = 3,04\text{mm}$. ..	25
Figura 10 - Variação do ganho com o aumento na espessura do substrato	26
Figura 11 - Arranjo proposto para o substrato.....	26
Figura 12 - S11 da Antena proposta	27
Figura 13 - Ganho da antena proposta.....	27
Figura 14 – a) Antena fabricada b) Configuração do substrato com a camada de ar entre as placas de FR4.	28
Figura 15 - Valores de S11 medido e simulado.....	29
Figura 16 - Variação de S11 com a camada de ar	30
Figura 17 - <i>Setup</i> de medição para comparação entre as antenas comercial e proposta.	31
Figura 18 - Comparação do S11 para as antenas.....	32

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valor do RSSI na leitura da etiqueta comercial	31
---	----

SUMÁRIO

1	Introdução	12
1.1	Objetivos	13
1.1.1	Objetivo Geral	13
1.1.2	Objetivos Específicos	13
1.2	Motivação	13
1.3	Metodologia	14
2	Revisão Bibliográfica	14
2.1	Teoria de Antenas	14
2.1.1	Diagrama de irradiação	15
2.1.2	Diretividade	16
2.1.3	Eficiência	16
2.1.4	Ganho	17
2.1.5	Polarização	18
2.1.6	Parâmetros de espalhamento (S)	20
2.2	Sistemas de Identificação por Radiofrequência (RFID)	21
3	Projeto da Antena Proposta	22
4	Validação e Discussões	29
5	Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros	32
	Referências	34

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas de identificação por radiofrequência, ou RFID (*Radiofrequency Identification*), surgiu como uma proposta para substituição do tradicional código de barras [1] na identificação de objetos e estão se tornando cada vez mais populares nas aplicações comerciais [2-4], principalmente por sua eficiência, sua tecnologia *wireless*, sua facilidade de implementação e, atualmente, a possibilidade de integração com sistemas que utilizam o paradigma da internet das coisas (*IoT, Internet of Things*) [5], [6].

Neste contexto, a pesquisa na área de sistemas RFID se renova para atender aos novos requisitos que surgem com o IoT e surge a necessidade de otimização dos processos já existentes, seja com o desenvolvimento de novas etiquetas, novos protocolos de comunicação [7] ou até mesmo na concepção de novas antenas mais eficientes [8].

Um dos elementos mais importantes do sistema RFID é a antena [9], [10]. É a partir dela que a informação é efetivamente transmitida e recebida. Dessa forma, é importante que as antenas utilizadas possuam parâmetros, tais como ganho, eficiência, polarização, entre outros, que satisfaçam as premissas necessárias à aplicação desejada. Sobre o último, isto é, polarização, é um fator essencial que deve ser levado em conta na compra ou concepção de uma antena pois dele depende a correta identificação das etiquetas do sistema [9].

Dependendo da aplicação, é inviável prever a posição na qual a etiqueta a ser identificada estará em relação à antena no momento da leitura, por exemplo, em atividades esportivas nas quais os participantes são identificados a partir de etiquetas RFID ou nas novas propostas que utilizam etiquetas RFID para monitoramento de sinais biológicos, por mais que seja aconselhado um local para o posicionamento da mesma, com o movimento humano e dependendo da posição da antena colocada, o alinhamento entre esta e a etiqueta não é garantido.

As etiquetas RFID são itens mais baratos e, no geral, têm polarização linear [10], ou seja, têm suas componentes campo elétrico confinada em um plano e precisam, portanto, que o vetor campo elétrico da antena receptora também esteja alinhado a este plano para correta identificação [9], [11]. Uma forma de contornar esta situação é

utilizando antenas de polarização circular [12], nas quais é realizada a leitura das etiquetas independentemente da posição relativa entre estas e a antena.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolvimento de uma antena de polarização circular para leitor de sistema RFID na frequência de 915MHz.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Pesquisar na literatura sobre as principais técnicas de concepção de antenas com polarização circular.
- Simular uma antena cujos parâmetros (ganho, eficiência, S11) sejam competitivos com as opções existentes no mercado.
- Utilizar materiais de baixo custo como o substrato FR4.
- Fabricar a antena.
- Validar experimentalmente os resultados obtidos nas simulações.

1.2 MOTIVAÇÃO

Os sistemas RFID exigem, cada dia mais, precisão e confiabilidade em seus resultados, desta forma, o trabalho desenvolvido foi motivado pela sensibilidade da leitura e escrita de etiquetas RFID devido à falta de alinhamento com a antena utilizada em testes, ou ainda a necessidade em realizar este posicionamento [5]. Assim, em aplicações em que este controle da orientação não é possível de ser realizado, fica comprometida a eficácia do sistema RFID pois a transmissão da informação completa não é garantida. Com o avanço do IoT e das aplicações RFID no corpo humano, se torna necessário cada vez mais um sistema que previna esse tipo de incertezas.

Neste contexto, as antenas de polarização circular surgem como uma opção oportuna para resolver este problema de alinhamento [13].

Além disso, observou-se que as antenas de polarização circular utilizadas no Brasil são, na sua maior parte, importadas do mercado estrangeiro e, além de possuírem preços bastante elevados, não apresentam desempenho satisfatório nos testes realizados. Neste contexto, como é possível realizar, de forma simples, a fabricação localmente, é proposta, então, uma antena de baixo custo e com melhor desempenho do que aquele apresentado pela antena comercial.

1.3 METODOLOGIA

A metodologia empregada neste trabalho consistiu, primeiramente, no estudo da teoria de antenas e na pesquisa bibliográfica sobre os princípios da polarização circular, bem como as geometrias propostas para obtê-la.

Em seguida, foi utilizado o software de simulações eletromagnética HFSS (*High Frequency Structure Simulator*) da ANSYS® para fazer ensaios com as geometrias propostas na literatura e fazer a concepção e otimização de uma nova estrutura.

Em seguida, a antena foi fabricada e testes foram realizados para validar o resultado obtido em simulação.

Por fim, foi realizado um teste comparativo para avaliar o desempenho da antena proposta em relação a uma antena comercial.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

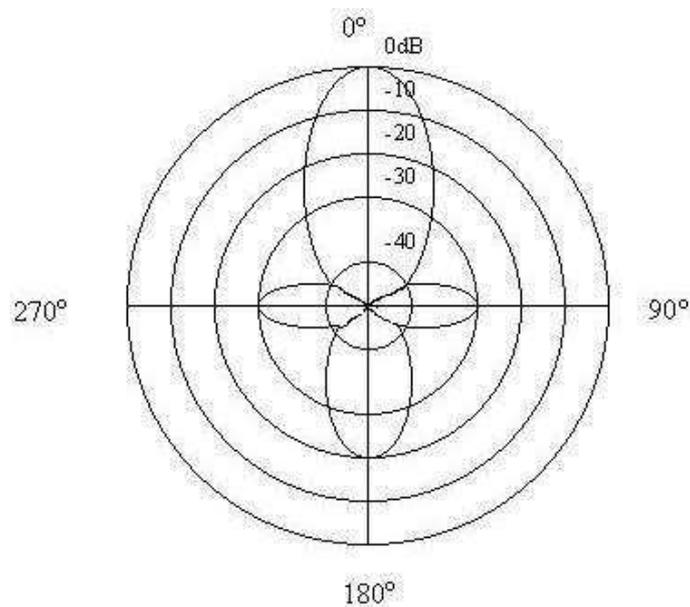
2.1 TEORIA DE ANTENAS

Uma antena é, geralmente, um dispositivo metálico utilizado para transmitir ou receber ondas de rádio [14], isto é, uma antena é o meio através do qual informações podem ser enviadas ou recebidas usando ondas eletromagnéticas em sua transmissão. Dentre os diversos tipos de antenas existentes, este trabalho se deterá às antenas de microfita planares.

2.1.1 DIAGRAMA DE IRRADIAÇÃO

O diagrama de irradiação é uma representação gráfica das propriedades espaciais de irradiação de uma antena [15]. Com esse diagrama é possível identificar a distribuição relativa da potência irradiada pela antena no espaço e, portanto, determinar o funcionamento esperado da antena. Um exemplo de diagrama de irradiação é exibido na Figura 1.

Figura 1 – Diagrama de irradiação de uma antena



Fonte: www.gta.ufrj.br

Um diagrama de irradiação é dividido em lóbulos, que são divididos em principal ou laterais. O primeiro se refere à direção na qual se concentra a maior parte da potência irradiada pela antena, já os lóbulos laterais são as demais regiões de menor intensidade de irradiação das ondas eletromagnéticas [16], estes, em geral, são indesejados e devem ser minimizados, exceto em aplicações que seja necessária que a antena irradie o mais isotropicamente (com mesma intensidade em todas as direções) possível.

Na Figura 1 pode-se observar um diagrama de irradiação bidimensional com lóbulo principal na direção de 0° e lóbulos secundários em 90°, 180° e 270°.

Sendo assim, o diagrama de irradiação é um parâmetro a se observar ao se posicionar uma antena em um sistema pois, dependendo da sua distribuição espacial, o sinal transmitido pode não ser enviado, ou recebido, de forma eficiente.

2.1.2 DIRETIVIDADE

A diretividade é um parâmetro que determina a capacidade de uma antena de concentrar sua potência irradiada em uma determinada direção [15]. Desta forma, uma antena dita diretiva tem em seu lóbulo principal toda ou grande parte de sua potência total.

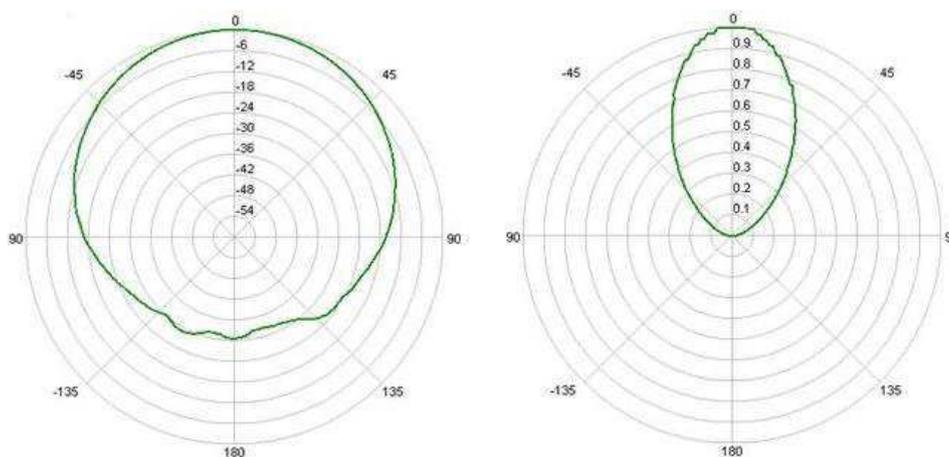
Diretividade é uma medida quantitativa calculada como sendo a razão entre a intensidade de irradiação na direção desejada e a intensidade de irradiação média da antena [16], ou ainda, a irradiação equivalente de uma antena isotrópica, que irradia em todas as direções com a mesma intensidade [17], de mesma potência U_0 .

Desta forma, dado que a potência média irradiada pela antena é P_{rad} e U é a intensidade de irradiação na direção desejada, a diretividade D de uma antena é dada pela Equação (1).

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (1)$$

Uma antena isotrópica tem, a partir da equação apresentada, diretividade igual a 1, ou 0 dB. A Figura 2 mostra dois diagramas de irradiação, onde pode-se observar que no segundo, à direita, a antena é bem mais diretiva (tem maior diretividade) do que aquela cujo diagrama de irradiação é exibido à esquerda.

Figura 2 - Exemplo de diretividade de uma antena



Fonte: www.tebochka.ru

2.1.3 EFICIÊNCIA

A eficiência total de uma antena e_0 é um parâmetro que leva em consideração as perdas nos terminais de entrada bem como na própria estrutura da antena. Essas perdas ocorrem devido a:

1. reflexões causadas pelo descasamento entre a linha de transmissão e a antena;
2. efeito Joule.

Em termos gerais, a eficiência total é escrita como [15]:

$$e_0 = e_r e_c e_d, \quad (2)$$

onde

e_0 = eficiência total (adimensional)

e_r = eficiência de reflexão (descasamento) = $(1 - |\Gamma|^2)$ (adimensional)

e_c = eficiência de condução (adimensional)

e_d = eficiência do dielétrico (adimensional)

Γ = coeficiente de reflexão nos terminais de entrada da antena

Os termos e_c e e_d normalmente são determinados experimentalmente e não podem ser separados. Desta forma, é mais conveniente utilizar o termo eficiência de irradiação $e_{cd} = e_c e_d$, que determina a relação entre o ganho e a diretividade da antena, como será apresentado a seguir.

2.1.4 GANHO

Um parâmetro bastante importante para a avaliação do desempenho de uma antena é o seu ganho. O ganho absoluto G , em uma dada direção, é dado pela relação entre a intensidade de irradiação da antena nesta direção e a intensidade que seria obtida se a antena irradiasse toda a sua potência de entrada isotropicamente [17]. Essa intensidade de irradiação isotrópica equivale a potência de entrada dividida por 4π . Matematicamente,

$$G = 4\pi \frac{\text{intensidade de irradiação}}{\text{potência de entrada}} = 4\pi \frac{U}{P_{ent}} \quad (\text{adimensional}). \quad (3)$$

Quando a direção não é determinada, o ganho é dado na direção de máxima irradiação [16].

Assim como a diretividade, o ganho representa a capacidade direcional da antena. No entanto, ao contrário dessa, o ganho leva também em consideração a eficiência da mesma. Temos que, a potência total irradiada (P_{irr}) relaciona-se com a potência total de entrada (P_{ent}) da seguinte forma:

$$P_{irr} = e_{cd}P_{ent} \quad (4)$$

Das Equações (3) e (4) podemos escrever:

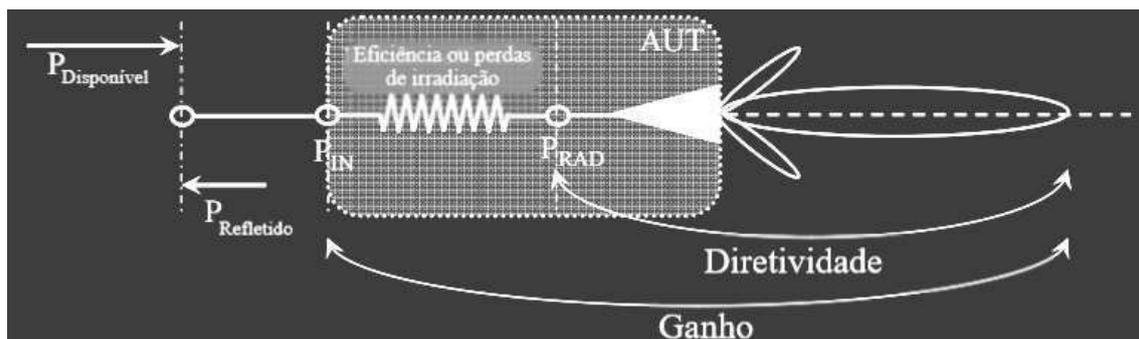
$$G(\theta, \phi) = e_{cd} \left[4\pi \frac{U}{P_{irr}} \right] \quad (5)$$

Comparando a expressão anterior para o ganho de uma antena com a expressão da diretividade (Equação (1)) determinamos que estas grandezas estão relacionadas por:

$$G = e_{cd}D \quad \text{ou} \quad G = D - e_{cd} \text{ (dB)} \quad (6)$$

Na Figura 3, é possível observar a relação entre ganho e diretividade bem como as perdas existentes por reflexão na entrada da antena. Na prática, quanto maior o ganho, maior o alcance da antena.

Figura 3 - Relação entre ganho e diretividade



Fonte: ww2.nearfield.com (adaptado)

2.1.5 POLARIZAÇÃO

Polarização é uma propriedade das ondas eletromagnéticas que descreve a variação da direção e da amplitude relativa do vetor campo elétrico com o tempo [15]. Ou seja, dada a direção de propagação da onda, a polarização é o traço descrito pela extremidade do vetor campo elétrico ao longo do tempo, observado nesta direção.

Uma onda eletromagnética é composta por um campo elétrico e um campo magnético. Sua propagação é dita transversal, isto é, o vetor campo elétrico, o vetor campo magnético e a direção de propagação da onda são ortogonais entre si [16]. Para estudar a polarização da onda, nos deteremos ao vetor campo elétrico [17].

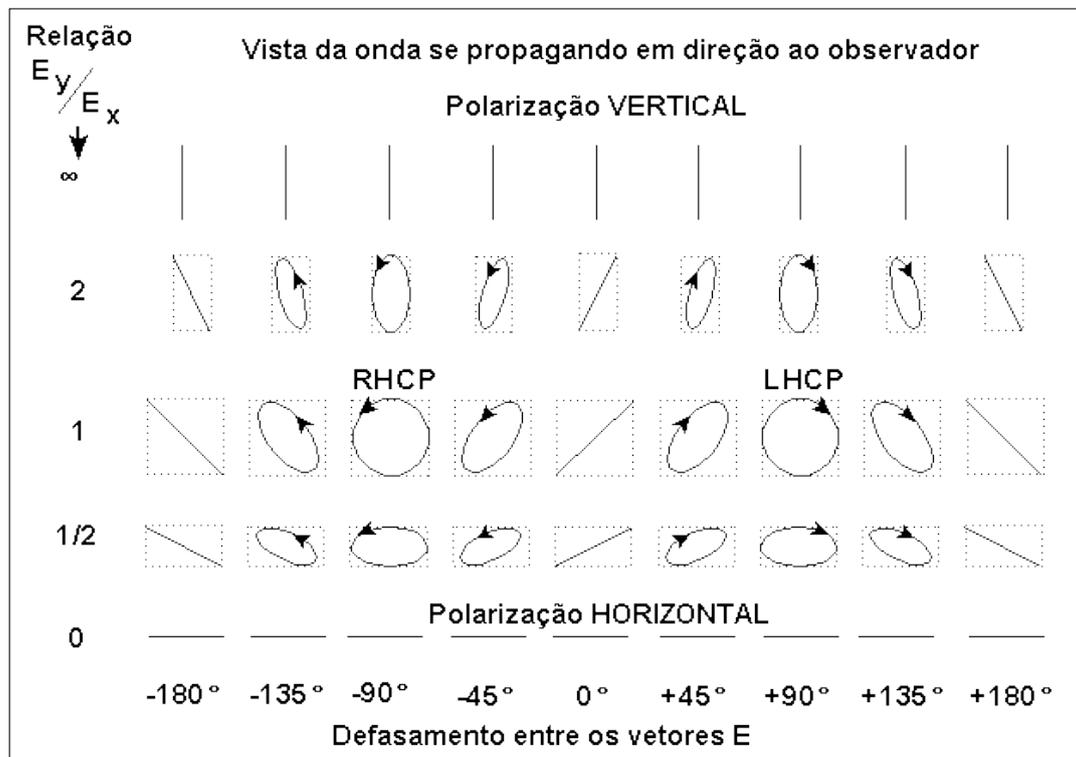
Supondo uma onda se propagando ao longo do eixo z, podemos escrever seu vetor campo elétrico como:

$$\vec{E}(z, t) = E_{ox} \cos(kz - \omega t) \hat{x} + E_{oy} \cos(kz - \omega t + \phi) \hat{y}, \quad (7)$$

, onde $E_x = E_{ox} \cos(kz - \omega t)$ e $E_y = E_{oy} \cos(kz - \omega t + \phi)$.

Se as duas componentes do campo elétrico estão em fase, isto é, se $\phi = 0$ ou $\phi = \pm\pi$, a razão entre as duas componentes é constante, logo, a polarização é dita linear. Caso contrário, a polarização é dita elíptica. Um caso particular é quando $\phi = \pm\frac{\pi}{2}$ e $E_x = E_y$ e a polarização é dita circular [17]. Ainda, se $\phi = +\frac{\pi}{2}$ a polarização é dita RHCP (do inglês, *right hand circular polarized*), isto é, segue a regra da mão direita e, portanto, o sentido de rotação é anti-horário, enquanto que se $\phi = -\frac{\pi}{2}$, a polarização é LHCP (do inglês, *left hand circular polarized*), que possui rotação no sentido horário. A Figura 4 apresenta como a onda é vista no referencial do observador (da etiqueta, por exemplo) para diferentes valores de ϕ (defasamento entre as componentes do campo elétrico) e da relação entre as amplitudes de E_x e E_y , que também é chamado de razão axial (ou *axial ratio*, em inglês).

Figura 4 - Polarização de antenas



Fonte: <http://www.molrc.com>

Entretanto, para a correta escolha da antena a ser usada na aplicação desejada é importante levar em consideração outro fator chamado de perdas por polarização [16]. Isto se dá devido à falta de alinhamento entre a antena emissora e a receptora ou entre a antena e a etiqueta, por exemplo. Para maximizar a transmissão é ideal que todos os elementos irradiantes tenham a mesma polarização. A perda de polarização, L , é calculada como

$$L = \cos^2 \alpha \quad \text{ou} \quad L = 20 \log(\cos \alpha) \text{ (dB)}, \quad (8)$$

se as antenas de emissão e de recepção estão alinhadas então $\cos 0^\circ = 1$, o que significa 0dB de ganho [16].

2.1.6 PARÂMETROS DE ESPALHAMENTO (S)

Sejam a_x e b_x as amplitudes complexas normalizadas das ondas incidentes e refletidas, respectivamente, nas portas x , podemos definir a matriz de espalhamento de um quadripolo [18], isto é, um sistema com duas portas, como sendo,

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} \quad (9)$$

em que os parâmetros S representam [19]

- S_{11} : coeficiente de reflexão na porta 1 (entrada).
- S_{21} : coeficiente de transmissão direto (da entrada, porta 1, para a saída, porta 2).
- S_{22} : coeficiente de reflexão na porta 2 (saída).
- S_{12} : coeficiente de transmissão reverso (da saída, porta 2, para a entrada, para a porta 1).

A matriz S , como também é chamada, é uma propriedade intrínseca do dispositivo e seus valores são dados por

$$S_{11} = \left. \frac{b_1}{a_1} \right|_{a_2=0}$$

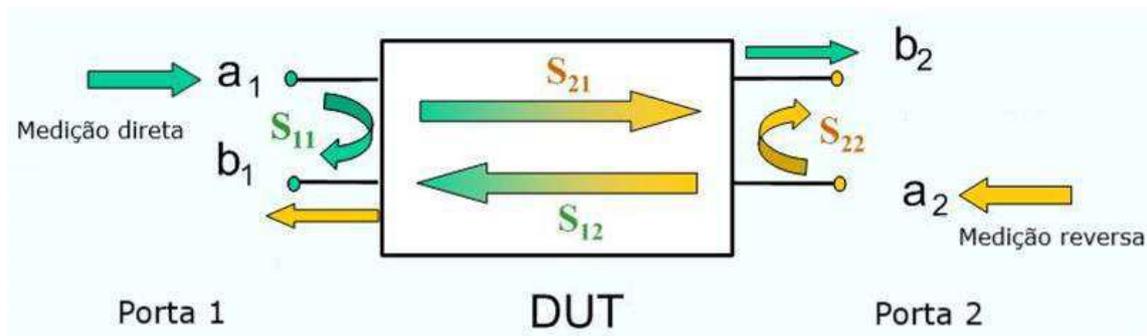
$$S_{12} = \left. \frac{b_1}{a_2} \right|_{a_1=0}$$

$$S_{21} = \left. \frac{b_2}{a_1} \right|_{a_2=0}$$

$$S_{22} = \left. \frac{b_2}{a_2} \right|_{a_1=0}$$

Por fim, a Figura 5 mostra, de forma simplificada, como se comportam os parâmetros citados em um sistema de duas portas, denominado como DUT (do inglês, *device under test*, ou ainda, dispositivo sob teste). Neste trabalho, focaremos no parâmetro S_{11} pois, além de trabalharmos apenas com uma antena e, portanto, uma porta, é o de mais fácil medição, que é feita utilizando um analisador de espectro. Como este parâmetro mede a reflexão de entrada da antena é importante que, para a frequência de trabalho (915MHz), este valor seja o menor possível. Para um caso ideal, $S_{11} = -\infty$.

Figura 5 - Parâmetros S



Fonte: www.labrf.av.it.pt (adaptado)

2.2 SISTEMAS DE IDENTIFICAÇÃO POR RADIOFREQUÊNCIA (RFID)

O sistema de identificação por rádio frequência (RFID) consiste numa tecnologia que utiliza a reflexão das ondas de rádio, isto é, o retroespalhamento (em inglês, *backscattering*) em um marcador colocado em um objeto para identificá-lo. As informações do item identificado são, geralmente, armazenadas em um chip de silício que as transmite para serem captados por uma antena receptora, que, por sua vez, as envia ao sistema responsável pela decodificação da informação, concluindo, assim, o reconhecimento do objeto [20]. Um esquema desse processo é representado na Figura 6.

A tecnologia RFID se sobressai dentre outras de identificação de objetos por fatores como: não requerer contato visual direto entre a etiqueta e seu leitor, como no código de barras; realizar leitura simultânea de várias etiquetas; maior capacidade de armazenamento de dados (para as etiquetas com o chip de silício).

Figura 6 - Sistema RFID



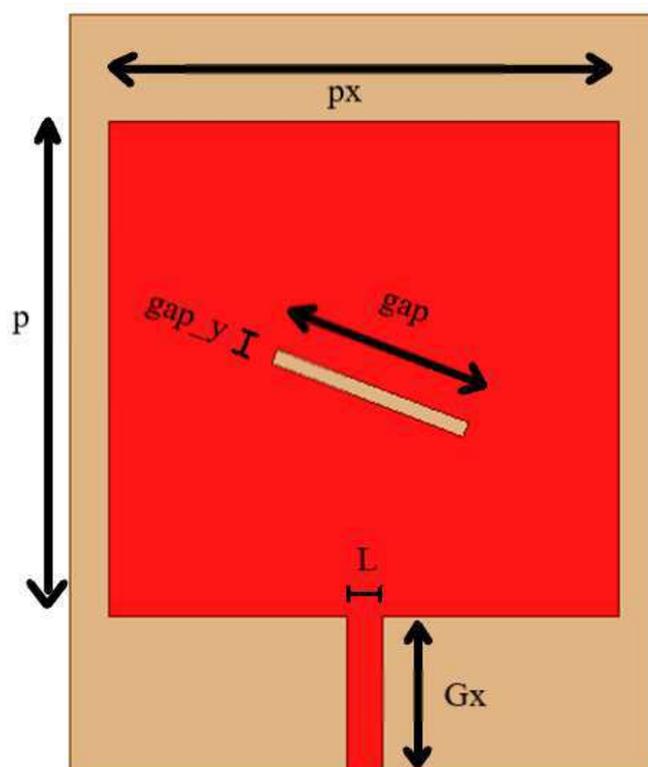
Fonte: www.scielo.br

As aplicações para o RFID são inúmeras, tais como gerenciamento de estoques, pessoas, armazéns, desperdícios; rastreamento de contêineres, cargas, animais; entre outras [5], [21]-[23].

3 PROJETO DA ANTENA PROPOSTA

Após pesquisa na literatura buscando geometrias de antenas com polarização circular para ter como base no desenvolvimento do projeto, foi proposto o *design* mostrado na Figura 7, onde $p = 98\text{mm}$, $p_x = 99,7\text{mm}$, $\text{gap} = 40,2\text{mm}$, $\text{gap}_y = 3,1\text{mm}$, $L = 7\text{mm}$ e $G_x = 30,9\text{mm}$. A placa de FR4 utilizada tem as dimensões $11,5\text{cm} \times 15\text{cm}$. Como um dos objetivos do trabalho é propor uma alternativa de baixo custo às antenas de polarização circular comerciais, o substrato escolhido foi o FR4 com espessura de $h = 1,52\text{mm}$, $\epsilon_r = 4.4$ e tangente de perdas $\text{tg}\delta = 0,02$.

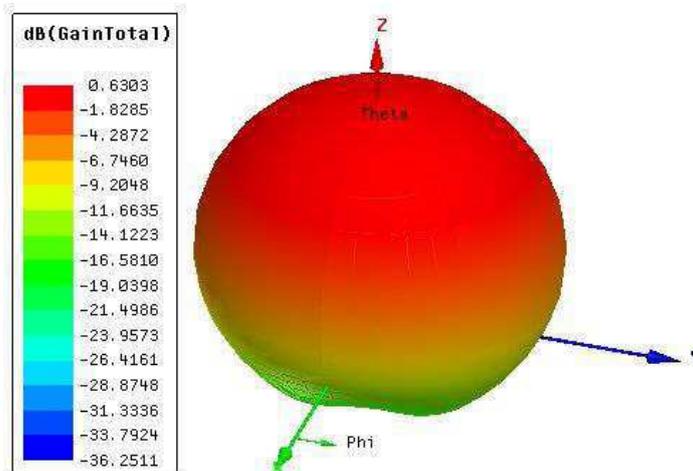
Figura 7 - Antena proposta



Fonte: O próprio autor

Ao simular a antena proposta no *software* HFSS, da ANSYS®, os resultados obtidos são exibidos na Figura 8. O ganho máximo obtido foi de 0,63dB, o que é considerado muito baixo, principalmente se comparado às antenas comerciais, e um S11 de -34,68dB na frequência de 915MHz, o que representa um bom casamento de impedância, pois significa que praticamente toda a potência inserida na antena é transmitida e apenas 0,034% é refletida.

Figura 8 - Valores de a) ganho e b) S11 para a antena com a espessura $h = 1,52\text{mm}$.



a)



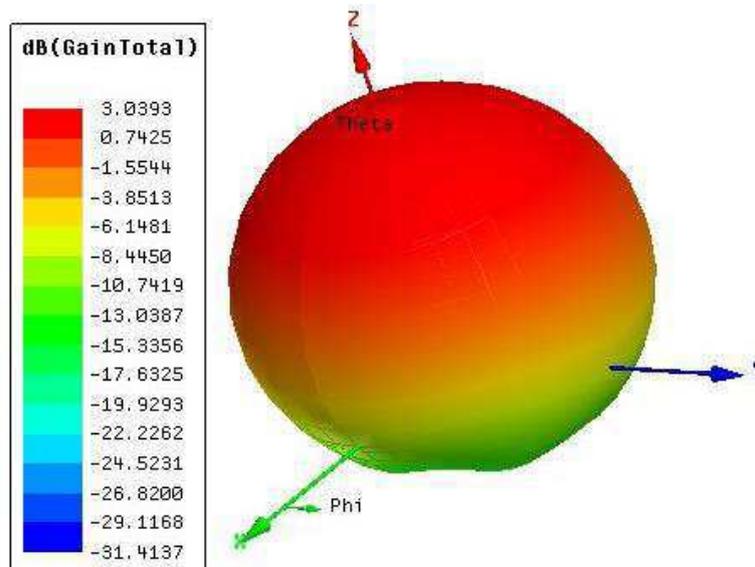
b)

Fonte: O próprio autor

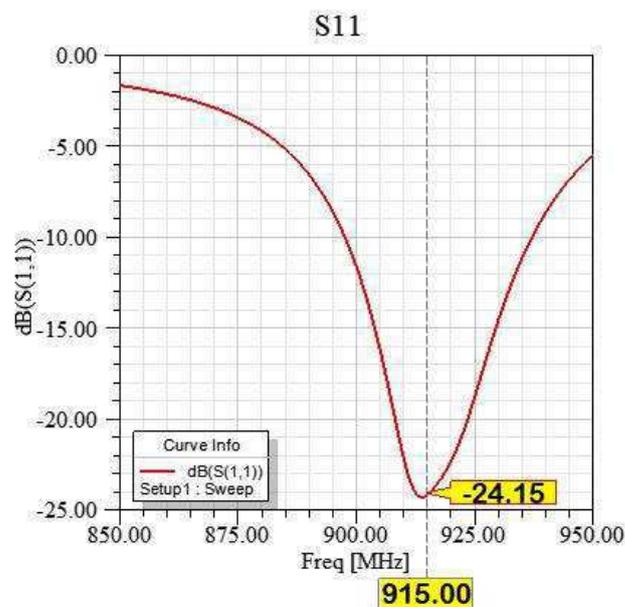
Em seguida, visando aumentar o ganho da antena, foi proposto o aumento da espessura do substrato, assim, foi simulado o caso em que duas placas de FR4 seriam sobrepostas para compor esta nova espessura, uma vez que o material era limitado à placas de 1,52mm de altura, o que resultou em $h = 3,04mm$. Os resultados obtidos são exibidos na Figura 9.

Podemos ver que o ganho máximo foi de 3,04dB e o valor do S11 de -24,15dB para a frequência de trabalho, 915MHz. Assim, para o S11, o valor foi um pouco inferior ao obtido anterior, mas ainda considerado um resultado razoável (abaixo de -10dB) e já em relação ao ganho, o resultado se apresentou melhor do que o anterior, com apenas uma placa de FR4, contudo, ainda não atingiu o objetivo do projeto, que é de se equiparar, ou superar, os valores encontrados nas antenas comerciais, que são da ordem de 6-10dB de ganho.

Figura 9 - Valores de a) ganho e b) S11 para a antena com a espessura $h = 3,04\text{mm}$.



a)

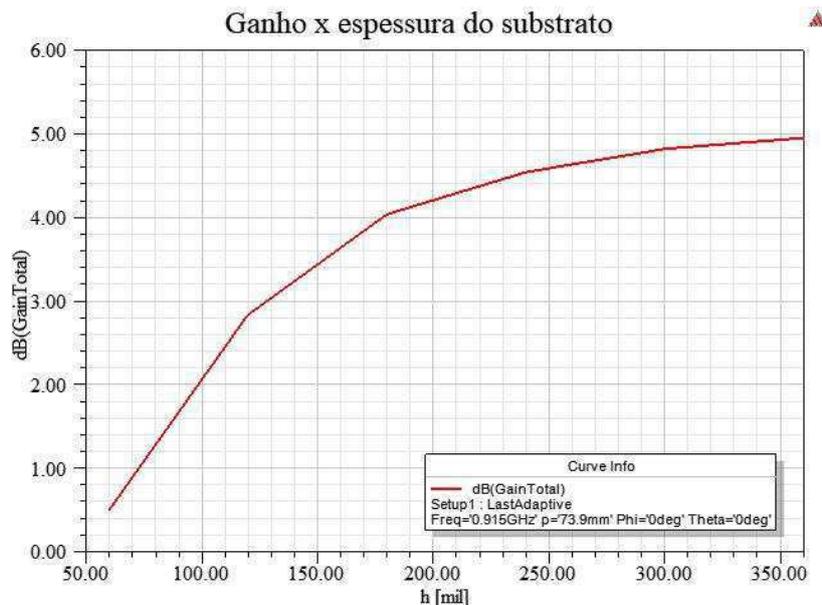


b)

Fonte: O próprio autor

Assim, ao observar o aumento significativo do ganho ao duplicar a altura da camada de substrato, foi simulado, então, o uso de três placas de FR4 sobrepostas, contudo, apesar de haver um aumento no valor do ganho, foi observado que não houve uma diferença significativa como anteriormente para justificar o uso da terceira placa. Isto se dá devido ao valor da tangente de perdas do FR4 ser muito alta, assim, com um maior volume de substrato, maiores serão as perdas e, portanto, o ganho tende a se estabilizar, como mostra a Figura 10 (60mil = 1,52mm).

Figura 10 - Variação do ganho com o aumento na espessura do substrato



Com os resultados obtidos até o momento e visando ainda aumentar o ganho, visto que os 3dB obtidos com as duas placas de FR4 não são competitivos com as antenas para aplicações comerciais, procurou-se, então, outra forma de aumentar a altura do substrato e, conseqüentemente, o ganho sem ser por meio de novas placas de FR4. Assim, o ideal seria a utilização de um substrato com baixas perdas para este propósito, contudo, com a ideia de ser um projeto de baixo custo, essa opção é irrealizável visto que os substratos com baixas perdas são, geralmente, mais caros. Assim, foi sugerido a inserção de uma camada de ar entre as duas placas para mascarar o aumento da espessura do substrato, uma vez que o ar apresenta menos perdas do que o FR4 e mantém o conceito de baixo custo do projeto. A estrutura proposta para o substrato é exibida Figura 11.

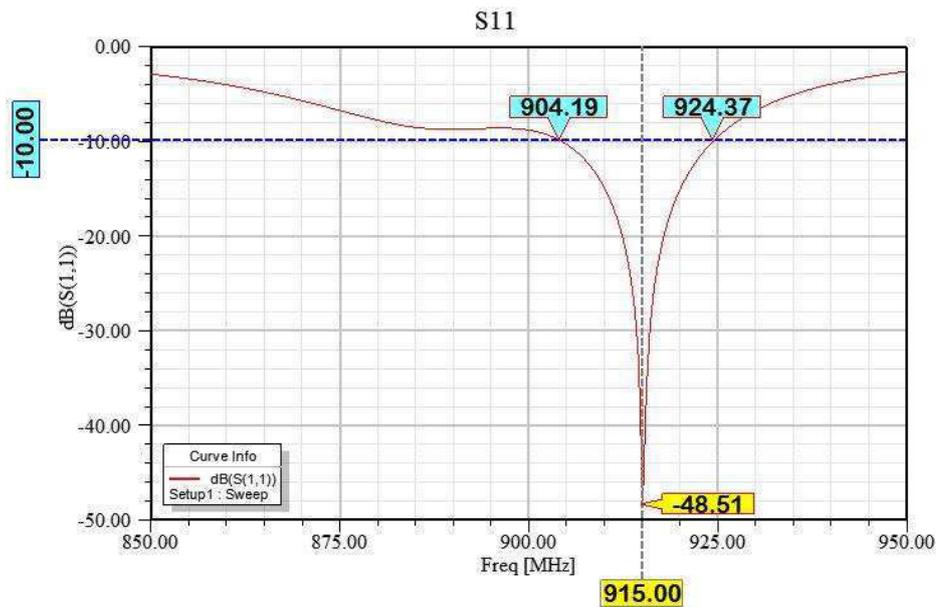
Figura 11 - Arranjo proposto para o substrato



Com essa nova estrutura, foram obtidos os resultados do S11 e do ganho são exibidos nas Figuras Figura 12 e Figura 13, respectivamente. O ganho máximo foi de 5,76dB e o S11 para 915MHz foi de -46,08dB, além de uma largura de banda de 20MHz,

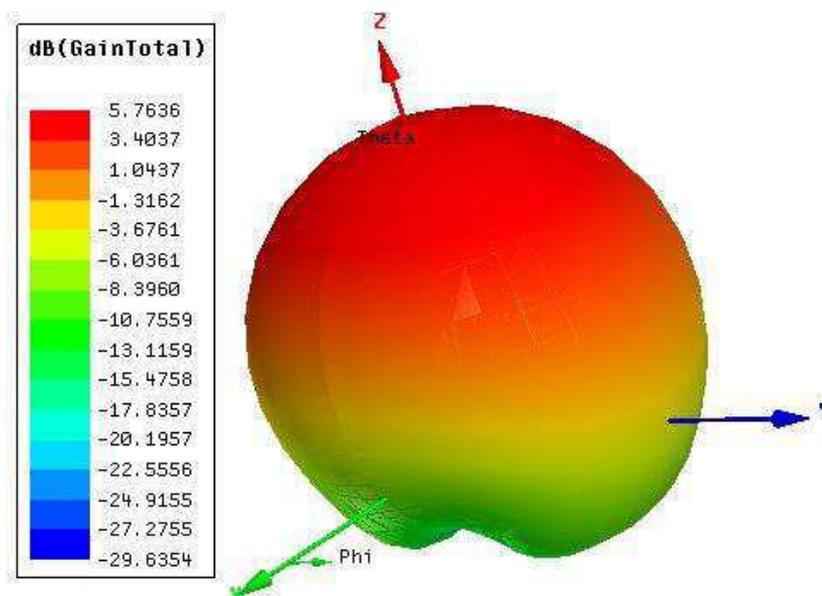
valores ainda melhores do que os obtidos anteriormente com apenas as duas placas de FR4. Os novos valores atendem, portanto, aos requisitos do projeto de se equiparar a valores obtidos com as antenas comerciais, isto é, entre 6-10dB de ganho, além do resultado do parâmetro de reflexão (S11) mostrarem um ótimo casamento de impedância na entrada da antena.

Figura 12 - S11 da Antena proposta



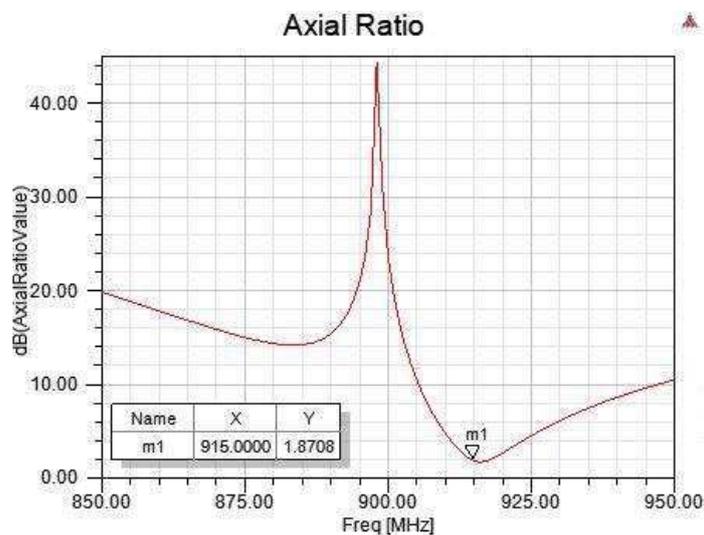
Fonte: O próprio autor

Figura 13 - Ganho da antena proposta



Fonte: O próprio autor

Além disso, para avaliar a polarização da antena, foi medido o *axial ratio*, que é a relação entre as amplitudes das componentes do campo elétrico que, como visto, para uma antena de polarização circular deve ser igual a 1 ou 0dB. O valor obtido de 1,78dB nos mostra que a antena não é perfeitamente circular, contudo, uma antena é considerada de polarização circular se esse valor for até 3dB [24], [25].



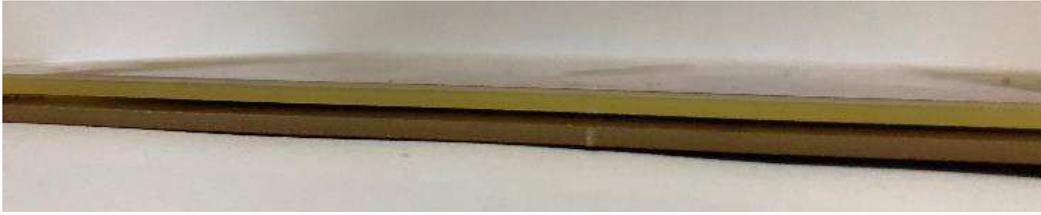
Fonte: O próprio autor

Após os resultados satisfatórios encontrados nas simulações, a antena foi fabricada utilizando duas placas de FR4 com 1,52mm de espessura e fibras de vidro de 1mm de altura foram usadas como suportes para simular a camada de ar entre elas. O resultado pode ser visto na Figura 14.

Figura 14 – a) Antena fabricada b) Configuração do substrato com a camada de ar entre as placas de FR4.



a)



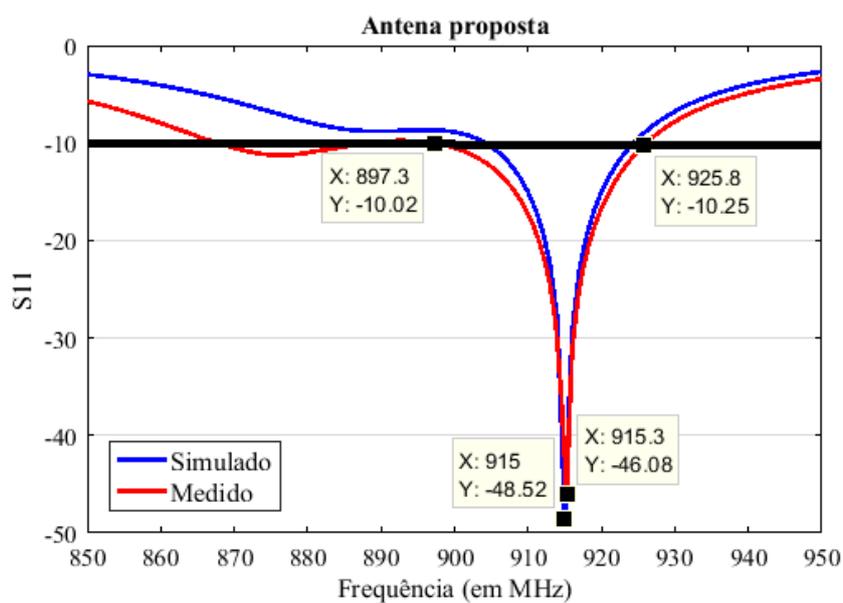
b)

Fonte: O próprio autor.

4 VALIDAÇÃO E DISCUSSÕES

Com a antena fabricada, foram realizadas medições para validar seu funcionamento ante os resultados obtidos nas simulações. Foi medido, então o parâmetro de reflexão (S_{11}) da antena com o Analisador de Redes de Micro-ondas Vetorial de Mão FieldFox, da Keysight. O resultado medido e o simulado são exibidos na Figura 15. Como pode ser observado, a antena fabricada apresentou um resultado bastante similar ao simulado, com $-48,52\text{dB}$ de S_{11} em 915MHz e uma largura de banda de aproximadamente 28MHz .

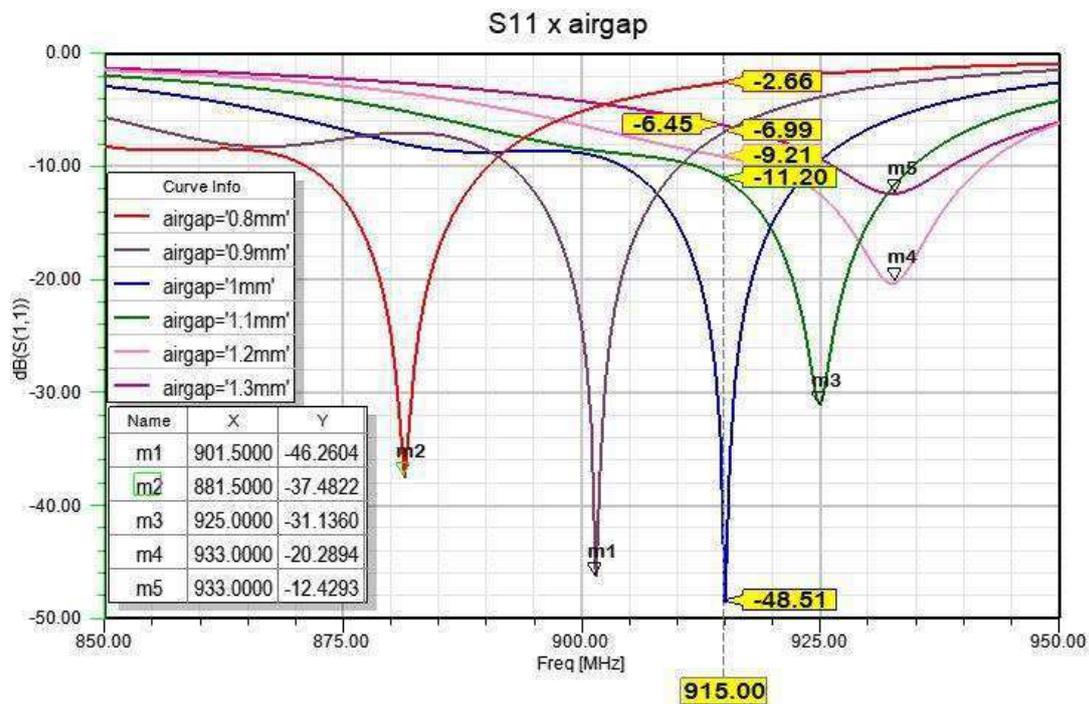
Figura 15 - Valores de S_{11} medido e simulado.



Fonte: O próprio autor.

Entretanto, nos resultados experimentais foi observado que o parâmetro S11 era bastante sensível à aplicação de tensão na antena, o que modifica a espessura da camada de ar, foi, então, realizada a simulação e constatada essa sensibilidade, mostrada na Figura 16. Experimentalmente não foi possível realizar tal comparação devido à falta de elementos de construção precisos para alterar a altura da camada de ar. Como pode ser observado, a frequência de ressonância da antena muda consideravelmente com uma simples variação de 0.1mm na espessura da camada de ar.

Figura 16 - Variação de S11 com a camada de ar



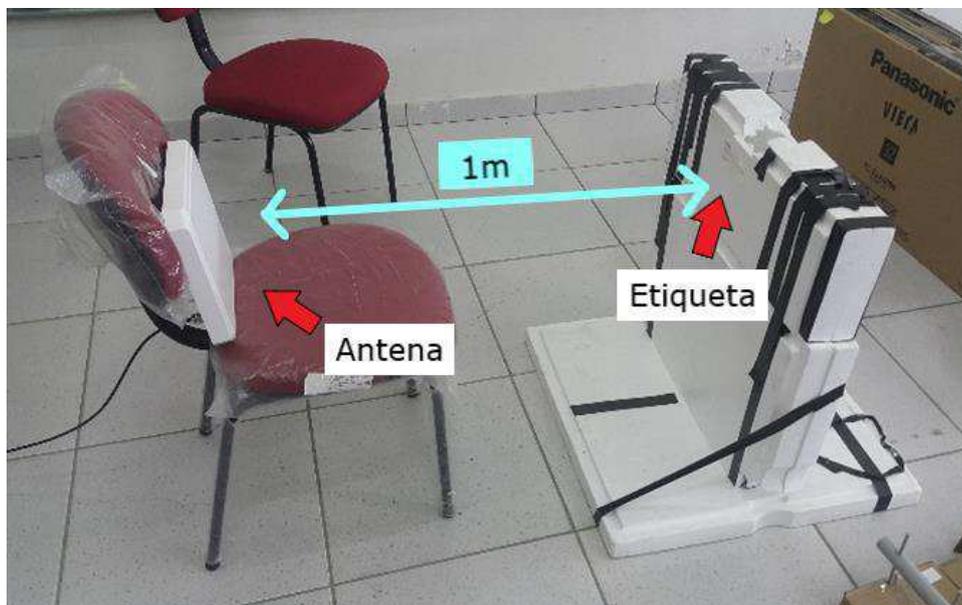
Fonte: O próprio autor.

Em seguida, foi realizado um teste para comparar o desempenho da antena proposta com uma antena comercial, para isto, foi utilizada a antena LAIRD PAL90209H, que, segundo o fabricante, possui polarização circular, 1dB de razão axial, 9dBic de ganho e faixa de frequência de trabalho entre 902-928MHz. O experimento consistiu em conectar a antena comercial, e depois a proposta à um leitor RFID, para identificar uma etiqueta comercial com polarização linear tanto na horizontal como na vertical, obtendo o valor da indicação de potência do sinal recebido, ou RSSI (do inglês, *Received Signal Strength Indication*). O *setup* de medição é exibido na Figura 17.

A Tabela 1 mostra os valores lidos na medição realizada. Como pode ser observado, os desempenhos das duas antenas são bastante similares, além disso, as

leituras horizontal e vertical possuem valores muito próximos, o que valida a polarização circular proposta para a antena.

Figura 17 - Setup de medição para comparação entre as antenas comercial e proposta.



Fonte: O próprio autor.

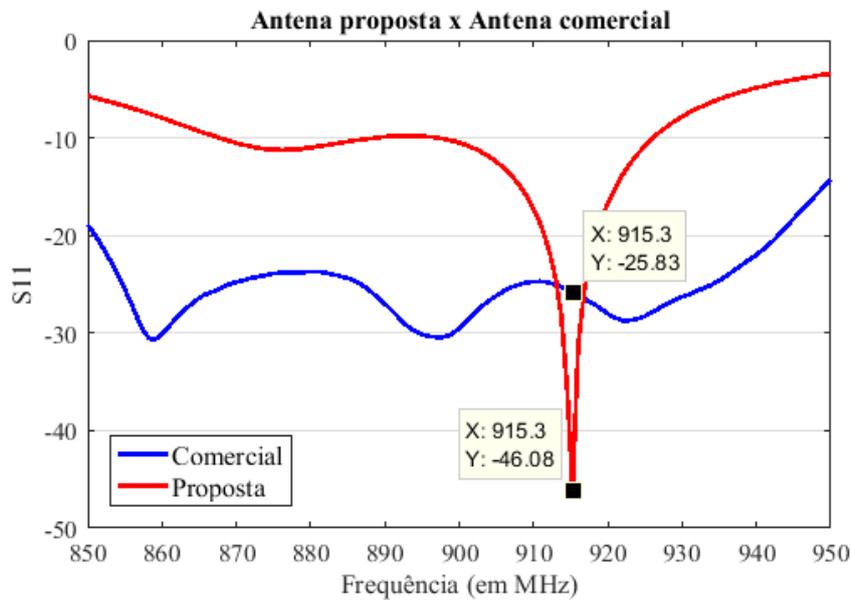
Tabela 1 - Valor do RSSI na leitura da etiqueta comercial

	Proposta (dBm)	Comercial (dBm)
Horizontal	-50.50	-47.32
Vertical	-48.60	-48.32

Fonte: O próprio autor.

Por fim, utilizando um analisador de espectro, foram medidos os valores do parâmetro S11 para ambas as antenas. A Figura 18 mostra o resultado desta medição. Como podemos notar, embora a antena comercial também possui bom casamento de impedância para a frequência proposta (915MHz), a antena proposta possui um menor coeficiente de reflexão e maior seletividade na frequência, o que também é importante para evitar interferências em outros equipamentos que trabalhem em frequências próximas.

Figura 18 - Comparação do S11 para as antenas.



Fonte: O próprio autor.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS

FUTUROS

Neste trabalho foi estudada a teoria de antenas e os princípios de propagação das ondas eletromagnéticas. Em seguida foi proposta a concepção de uma antena de polarização circular para aplicações RFID com o intuito de ser competitiva em relação às já existentes no mercado.

Desta forma, foi simulada e fabricada uma antena de polarização circular utilizando o FR4 como substrato de baixo custo. Além disso, foi proposta uma configuração inovadora no seu substrato, com a inserção de uma camada de ar, entre outras duas de FR4, o que aumentou significativamente o ganho da antena, otimizando, também, o parâmetro S11 medido e simulado.

Com a antena fabricada foram realizados testes que validaram os resultados de simulação e constataram seu comportamento como antena de polarização circular. Ao comparar com uma antena comercial, observou-se que os desempenhos foram similares, o que permitiria, por exemplo, a substituição da antena existente pela nova apresentada

neste trabalho. Além disso, a antena proposta tem dimensões menores do que a antena comercial: 11,5cm x 15cm contra 26cm x 26cm da LAIRD PAL90209H.

Contudo, a antena apresentou uma grande sensibilidade em relação à espessura da camada de ar existente entre suas placas de FR4, tanto experimentalmente como na simulação. Desta forma, é importante que o processo de fabricação seja bastante preciso para que o desempenho desejado seja alcançado. Além disso, a medição de ganho da antena deve ser realizada para que a validação total de seus parâmetros seja consolidada.

Como sugestão de trabalhos futuros, substituir a camada de ar por um material de baixas perdas ou um isopor, por exemplo, que simule o comportamento elétrico do ar para obter um resultado similar ao que foi apresentado no trabalho, contudo, sem a sensibilidade física existente no projeto atual. Além disso, conceitos metamateriais podem ser aplicado à antena desenvolvida para melhorar ainda mais o ganho e diminuir suas dimensões.

REFERÊNCIAS

- [1] S. Gakhar, J. Feldkamp, M. Perkins, R. Sun and C. J. Reddy, "Engineering RFID systems through Electromagnetic Modeling," in *2008 IEEE International Conference on RFID*, Las Vegas, NV, 2008, pp. 344-349.
- [2] Xing Ying Huo, Jun Hong Wang and M. E. Chen, "Circularly polarized microstrip antenna with two Asymmetric Circular slots for RFID application," in *2013 IEEE International Conference on Microwave Technology & Computational Electromagnetics*, Qingdao, 2013, pp. 184-187.
- [3] A. Sethy, T. K. Das and S. K. Behera, "Design of a circularly polarized patch antenna for RFID applications," in *2017 International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET)*, Chennai, 2017, pp. 999-1002.
- [4] W. H. Ng, E. H. Lim and B. K. Chung, "Compact folded patch antenna for UHF RFID," in *2017 Progress in Electromagnetics Research Symposium - Fall (PIERS - FALL)*, Singapore, 2017, pp. 132-134.
- [5] Z. Zhi-yuan, R. He and T. Jie, "A method for optimizing the position of passive UHF RFID tags," in *2010 IEEE International Conference on RFID-Technology and Applications*, Guangzhou, 2010, pp. 92-95.
- [6] B. Bukhari, C. Singh, K. R. Jha and S. K. Sharma, "Planar MIMO antennas for IoT and CR applications," in *2017 IEEE Applied Electromagnetics Conference (AEMC)*, Aurangabad, 2017, pp. 1-2.
- [7] N. Renuka, N. C. Nan and W. Ismail, "Embedded RFID tracking system for hospital application using WSN platform," in *2013 IEEE International Conference on RFID-Technologies and Applications (RFID-TA)*, Johor Bahru, 2013, pp. 1-5.
- [8] R. Suwalak and C. Phongcharoenpanich, "Parametric Study of a Circularly Polarized Planar Antenna for Reader of UHF RFID System," in *2007 Asia-Pacific Microwave Conference*, Bangkok, 2007, pp. 1-4.
- [9] J. Lu and H. Chin, "Planar circularly polarized circular antenna with clover slot for RFID system," in *2016 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)*, Okinawa, 2016, pp. 420-421.

- [10] D. D. Deavours, "A circularly polarized planar antenna modified for passive UHF RFID," in *2009 IEEE International Conference on RFID*, Orlando, FL, 2009, pp. 265-269.
- [11] M. Monedero "Miniature circularly polarized antenna for SAW sensor measurements" in *IMWS 2009*, pp. 1-4, September 2009.
- [12] J. Han and N. Myung, "Novel Feed Network for Circular Polarization Antenna Diversity," in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 13, pp. 979-982, 2014.
- [13] 2. J.J. Yu Sungkyun Lim "Design of an Electrically Small Circularly Polarized Parasitic Array Antenna for an Active 433.92-MHz RFID Handheld Reader" in *IEEE APS*, vol. 60, no. 5, pp. 2549-2554, March 2012.
- [14] IEEE Standard for Definitions of Terms for Antennas," in *IEEE Std 145-2013 (Revision of IEEE Std 145-1993)*, vol., no., pp.1-50, 6 March 2014.
- [15] Constantine A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, Wiley-Interscience, 2005.
- [16] A. Mathur, R. Trivedi, *Antenna and Wave Propagation*, Scientific Publishers, 2011.
- [17] K. A. Bakshi A. V. Bakshi U. A. Bakshi, *Antennas And Wave Propagation*, Technical Publications, 2009.
- [18] A. C. César. Matriz **Espalhamento (S)**. Agosto 2014. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/220622/mod_folder/content/0/Matriz%20S%20Parte%201.pdf> Acesso em: 25 jul. 2018.
- [19] **Parâmetros de Espalhamento**. Disponível em: <http://www.eletrica.ufpr.br/artuzi/te143/TE143_04.ppt> Acesso em: 25 jul. 2018.
- [20] S. Preradovic, S. M. Roy, N. C. Karmakar, "RFID System Based on Fully Printable Chipless Tag for Paper-/Plastic-Item Tagging," in *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol.53, no.5, pp.15-32, Oct. 2011.
- [21] Z. Yanjun, "Survivable RFID Systems: Issues, Challenges, and Techniques," in *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews*, vol.40, no.4, pp.406-418, July 2010.

- [22] R. Weinstein, "RFID: a technical overview and its application to the enterprise," in *IT Professional*, vol. 7, no. 3, pp. 27-33, May-June 2005.
- [23] P. Janpangern and C. Phongcharoenpanich, "Circularly polarized single-fed wide-slot antenna for UHF RFID reader," in *2017 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)*, Phuket, 2017, pp. 1-2.
- [24] R. Dhara, M. Midya, M. Mitra and S. K. Jana, "CPW-fed tetra band circular polarized antenna for wireless communication applications," in *2017 IEEE Applied Electromagnetics Conference (AEMC)*, Aurangabad, 2017, pp. 1-2.
- [25] T. Elshikh, M. A. Abdalla, A. A. Mitkees and A. Sayed, "Design and implementation of low cost active integrated microstrip circular polarized antenna for GPS application," in *2017 Japan-Africa Conference on Electronics, Communications and Computers (JAC-ECC)*, Alexandria, 2017, pp. 69-72.