

Desenvolvimento de Etiquetas RFID-UHF Têxteis

Rudrigo Rangel de Lima ^[1], Sávio Murillo Dias Bastos ^[2], Adaildo Gomes D'Assunção Junior ^[3], Lincoln Machado de Araújo ^[4], Gustavo Araujo Cavalcante ^[5]

[1] rudrigorangel@gmail.com. [2] saviomurillo@hotmail.com. [3] adaildo.assuncao@ifpb.edu.br. [4] lincoln.araujo@ifpb.edu.br.
[5] gustavo.cavalcante@ifpb.edu.br, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB)

RESUMO

Este artigo propõe o desenvolvimento de antenas têxteis para aplicações em sistemas de identificação por radiofrequência (RFID). O tecido *jeans*, comercialmente vendido, foi utilizado como substrato dielétrico, e como condutor, um tecido de poliéster com cobre, leve, flexível e condutivo. As propriedades elétricas do tecido *jeans* (permissividade elétrica e tangente de perda) foram caracterizadas utilizando o método da sonda coaxial e os resultados comparados com os encontrados na literatura. Resultados simulados para o de três antenas utilizando o *jeans* como substrato têxtil são apresentados. Três protótipos das antenas simuladas foram construídos e em seguida medições (distância (m) *versus* quantidades de leituras da *tag*) foram realizadas e comparadas com uma *tag* comercial, com bons resultados sendo obtidos.

Palavras-chave: Antenas Flexíveis. Antenas têxteis. Permissividade elétrica. RFID UHF. Tangente de perda.

ABSTRACT

This paper proposes the development of textile antennas for applications in radio frequency identification (RFID) systems. Jeans has been used as a dielectric substrate, and, as a conductor, a highly conductive, lightweight and flexible polyester fabric with copper. The dielectric properties of the jeans (electrical permittivity and loss tangent) were characterized using the coaxial probe method and the results compared with those found. Simulated results for the of three antennas using jeans as a textile substrate are shown. Three prototypes of the simulated antennas were built and then measurements were taken (distance (m) versus number of readings) and compared with a commercial tag, good results have been obtained.

Keywords: Flexible Antennas. Electrical permittivity. Tangent of loss. Textile antennas. UHF RFID.

1 Introdução

Os estudos da aplicabilidade de tecidos em circuitos planares, tais como filtros, superfícies seletivas de frequência (*Frequency Selective Surface*, FSS) e antenas, estão se tornando cada vez mais atraentes, uma vez que a pesquisa e o desenvolvimento de tintas, linhas e tecidos condutivos abriram várias possibilidades de integrar tecnologias de comunicações sem fio no vestuário do cotidiano das pessoas.

A junção de duas áreas que até então não possuíam nenhuma afinidade, que é a eletrônica em conjunto com a área têxtil, proporcionaram uma revolução na indústria de vestuário. As roupas que eram apenas para a proteção das intempéries da natureza passaram a ser utilizadas em diversas áreas (biomédica, segurança privada, militar e telecomunicações) para o monitoramento dos sinais vitais e localização de indivíduos (PARK, JAYARAMAN, 2010; LEE, TAK, CHOI, 2017; AHMED *et al.*, 2019; JEONG, BYCHKOV, SEARSON, 2019; WU, LI, 2019).

Todo equipamento de comunicação sem fio necessita de uma antena. Mesmo as antenas mais modernas são fabricadas de cobre ou outros metais, com rígidas limitações com relação: às aplicações, a quanto elas podem ser dobradas e, principalmente, a quantas vezes elas podem ser flexionadas antes que a fadiga do metal as inutilize completamente. As antenas com características flexíveis possuem vasta possibilidade de utilidade em aplicações onde a rigidez das antenas tradicionais representa um empecilho, como é o caso de sensores e outros dispositivos que podem ser integrados a roupas.

O constante interesse nos últimos anos por dispositivos mais leves, cada vez mais compactos, flexíveis e com custo reduzido, levou a uma nova linha de pesquisa, que é o estudo e desenvolvimento de substratos têxteis condutivos que possam ser aplicados no desenvolvimento de circuitos planares para aplicações nas mais diversas áreas. No futuro, as roupas não apenas protegerão o corpo humano contra as intempéries do meio ambiente, mas também fornecerão dados sobre a condição de saúde e meio ambiente do usuário (SILVA JUNIOR *et al.*, 2016).

Uma vasta literatura relacionada ao estudo e ao desenvolvimento de circuitos planares têxteis está disponível, o que demonstra o grande interesse pelos pesquisadores. Excelentes resultados de uma antena têxtil para faixa de frequência 2,45 GHz foi

apresentado em Lajevardi e Kamyab (2017). Neste trabalho, um substrato têxtil e um metamaterial foram utilizados como elementos irradiadores, visando a ultra miniaturização da estrutura. Em Wang e Li (2018) foi proposto uma antena têxtil vestível *dual band*, com faixa de operação entre 2,45 e 5,8 GHz (banda ISM - *Industrial Scientific and Medical*) utilizando como substrato, o tecido *jeans* que possui características desejáveis para integração nas roupas, além de apresentar bons resultados.

O desenvolvimento de etiquetas RFID têxteis utilizando vários métodos de bordados e que podem ser perfeitamente integradas na roupa é discutido em Ukkonen, Sydanheimo e Rahmat-Samii (2012). Em Tennant, Hurley e Dias (2012) é realizada uma caracterização apenas experimental de duas superfícies seletivas em frequência (FSS, *Frequency Selective Surface*) têxteis, uma do tipo *patch* e outra do tipo abertura. Em Fu *et al.* (2015), um estudo do comportamento de antenas construídas para RFID foi realizado, quando submetidas a lavagens, e avaliado qual a melhor proteção para as mesmas. No mesmo trabalho, a influência do tecido e da técnica utilizada para confecção das antenas também é relatada. A confecção de uma antena que pode ser integrada a boinas militares para um sistema de posicionamento, utilizando a banda L1 do Sistema de Posicionamento Global (GPS, *Global Positioning System*) para ambientes abertos ou RFID para ambientes fechados, foi apresentado em Lee, Tak e Choi (2017).

Nesse contexto, neste artigo é apresentado o desenvolvimento de antenas têxteis para RFID-UHF que podem ser incorporadas em vestimentas para diversas aplicações, estruturado em cinco seções. Na seção 2, a fundamentação teórica dos sistemas de RFID, das antenas de microfita, das estruturas e composições dos tecidos é apresentada, bem como os principais parâmetros eletromagnéticos para a utilização dos mesmos em projetos de radiofrequência, sendo citados, ainda, alguns dos métodos utilizados para a caracterização de materiais, além de algumas configurações de antenas utilizadas em etiquetas RFID. Na seção 3, os protótipos das antenas, juntamente com suas dimensões e materiais utilizados para a confecção dos mesmos, são apresentados, bem como a metodologia utilizada para a realização do experimento prático. Na seção 4, os coeficientes de reflexão obtidos por meio das simulações computacionais realizadas no *software* e o comparativo entre as antenas desenvolvidas neste

trabalho e a antena comercial são apresentados e discutidos. Por fim, na seção 5, as conclusões deste trabalho são apresentadas, ressaltando os resultados obtidos no teste prático.

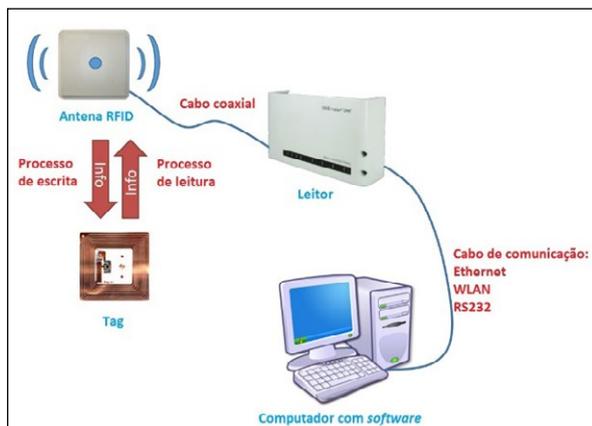
2 Referencial teórico

Nesta seção, a fundamentação teórica necessária é apresentada para a compreensão do trabalho desenvolvido, fornecendo informações a respeito de antenas de microfita, sistema RFID, tecidos e caracterização elétrica de materiais.

2.1 Sistema RFID

Os sistemas de identificação por radiofrequência RFID trata basicamente de um sistema de identificação de objetos de forma automatizada, e em tempo real, que utiliza ondas eletromagnéticas (KARMAKAR, 2010). O *hardware* de um sistema de RFID é composto, basicamente, de uma antena interligada a um leitor, uma *tag* ou *transponder*, que por sua vez é composta de uma antena, em geral, acoplada a um *microchip*, como demonstrado na Figura 1. Há ainda um *software* que é responsável por interpretar os dados vindos do leitor e verificar se aquele transponder parte do seu banco de dados, por exemplo.

Figura 1 – Esboço simplificado de um sistema RFID



Fonte: Adaptado de Valero, Adán e Cerrada (2015).

As *tags* podem ser classificadas de várias formas, como quanto a sua fonte de alimentação, capacidade de serem escritas e reescritas, possuírem ou não *microchip* (KARMAKAR, 2010).

Quanto à fonte de alimentação, existe *tags* passivas e ativas. As *tags* passivas dependem do leitor para serem energizadas, meio do retroespalhamento,

ou seja, o leitor irradia uma onda que, por sua vez, é recebida pela antena receptora (inclusa na *tag*) produzindo uma corrente e, conseqüentemente, uma tensão nos terminais da antena receptora, ativando o *microchip*. Essas correntes são similares em ambas as antenas, de acordo com o princípio da reciprocidade (BALANIS, 2005), com a antena receptora irradiando onda no caminho oposto, fazendo assim com que o leitor interprete os dados do *microchip* contido na *tag* (KARMAKAR, 2010).

As *tags* ativas não dependem, por sua vez, dos leitores para serem alimentadas, possuindo, em alguns casos, baterias, o que permite que as mesmas transmitam seus próprios sinais de forma autônoma.

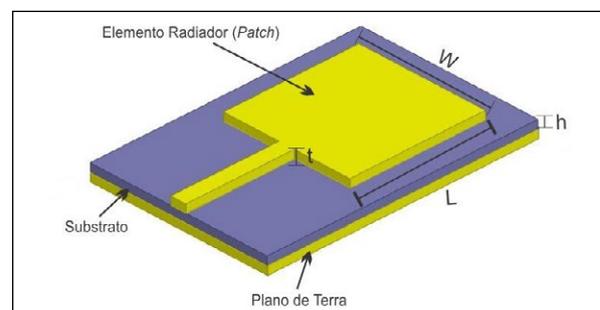
Os dados contidos nas *tags* podem ser, basicamente, de três tipos (KARMAKAR, 2010): somente leitura; regraváveis; ou uma única gravação e várias leituras.

No processo de redução de custos, uma alternativa é a remoção do *microchip*. Nesse modelo, as *tags* são denominadas *tags chipless*, com a construção da antena influenciando diretamente nas ondas de rádio refletidas, sendo possível realizar, através dessas, a identificação do objeto (EL-HADIDY e YASSER, 2019).

2.2 Antenas de Microfita

Uma antena de microfita pode ser considerada uma estrutura simples. É composta de um elemento irradiador denominado *patch*, de espessura t , separado do plano de terra por um substrato dielétrico, de altura h , conforme ilustrado na Figura 2. O *patch* atua como elemento irradiador, tendo, normalmente, o ponto máximo do diagrama de radiação normal a essa superfície. Esse tipo de radiação é, convencionalmente, denominado *broadside*, entretanto, o ponto máximo do diagrama de radiação pode ser ao longo do eixo do arranjo (*patch*), passando a ser denominado de *end-fire* (BALANIS, 2005).

Figura 2 – Antena de microfita patch retangular



Fonte: Elaboração própria.

O elemento irradiador, bem como o plano de terra, podem assumir diversos formatos. Entre os mais simples se destacam o retangular, o circular e o dipolo. Outros formatos mais complexos, como os fractais, podem ser utilizados tanto no plano terra como no *patch*. O formato do *patch* e do plano terra influenciam na distribuição de corrente e, conseqüentemente, na distribuição de campo na superfície da antena (POZAR; SCHAUBER, 1995).

2.3 Tecidos

Os tecidos são materiais compostos por fios ou fibras (naturais ou sintéticas) entrelaçadas, caracterizados, basicamente, pelos fios que os compõem e pela disposição dos mesmos ao longo do tecido. Cada tipo de tecido detém características específicas, como absorção térmica, permeabilidade, flexibilidade, gramatura (gramas por metro quadrado), entre outras (HOLANDA, 2016). Todas essas características influenciam, de alguma forma, no desempenho dos circuitos planares de micro-ondas e se deve ter em mente que tais características são difíceis de controlar em reais aplicações.

Os tecidos utilizados como substrato nos circuitos de micro-ondas possuem características desejáveis, quando comparados aos tradicionais substratos, como a capacidade de ser flexionado várias vezes antes de atingir a fadiga do material, leveza, fácil integração a superfícies irregulares e vestimenta (CAVALCANTE, 2014).

Normalmente, as propriedades eletromagnéticas dos materiais são definidas a partir da permissividade elétrica (ϵ) e da permeabilidade magnética (μ) (KASSEM; VIGNERAS; LUNET, 2010). A permissividade elétrica indica como o material reage quando um campo elétrico é aplicado sobre o material e a permeabilidade magnética indica como o material comporta-se a uma excitação magnética. A permissividade elétrica, ϵ , é uma grandeza complexa dada por (KASSEM; VIGNERAS; LUNET, 2010):

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r = \epsilon_0 (\epsilon_r' - j \epsilon_r'') \quad (1)$$

, onde, ϵ_0 é a permissividade no vácuo ($8,854 \times 10^{-12}$ F/m) e ϵ_r é a permissividade relativa do material dielétrico. A parte real da permissividade relativa, ϵ_r' , também

denominada de constante dielétrica, é uma medida da quantidade de energia armazenada em um material a partir de um campo elétrico externo. A parte imaginária da permissividade, ϵ_r'' , é denominada de fator de perda e é uma medida da quantidade de dissipação ou perdas de um material a partir de um campo elétrico externo. A parte imaginária da permissividade, ϵ_r'' , é sempre maior do que zero e, geralmente, é muito menor do que ϵ_r' .

A perda é geralmente indicada pela tangente de perdas ($tg\delta$), que é definida como a razão entre a parte imaginária, ϵ_r'' , e a parte real, ϵ_r' , da permissividade relativa, sendo expressa como:

$$tg\delta = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'} \quad (2)$$

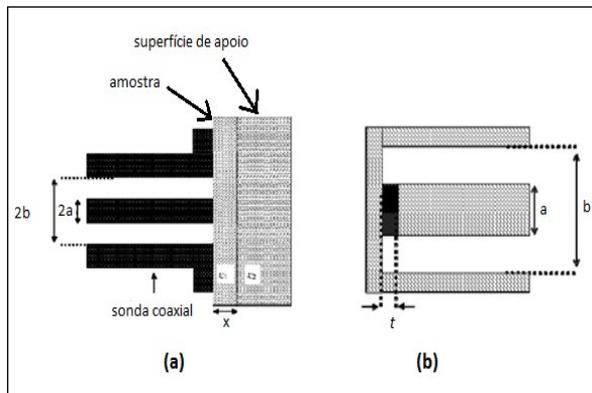
Medições precisas dessas propriedades são de grande importância para o processo de desenvolvimento dos circuitos planares.

2.4 Técnicas de caracterização de materiais

Quando as propriedades eletromagnéticas dos materiais não são conhecidas, é necessário utilizar técnicas para tal caracterização. Entretanto, isso se torna um processo minucioso, devido a vários pontos que devem ser observados, como a faixa de frequência utilizada no projeto, as propriedades físicas dos materiais (isotrópico ou anisotrópico, magnético ou não magnético, homogêneo ou heterogêneo), além da forma e da natureza do material (sólido, líquido, pastoso, placa, filme, elastomérico ou granular) (KASSEM; VIGNERAS; LUNET, 2010). Existem vários métodos para a caracterização de matérias fazendo uso de radiofrequência (RF), dentre eles: a sonda coaxial, a linha de transmissão, o espaço livre, a cavidade ressonante e o anel ressonador.

O método utilizado neste trabalho, para caracterizar o tecido, foi o método da sonda coaxial, que consiste em utilizar um Analisador de Rede Vetorial (VNA, *Vector Network Analyzer*), conectado a um cabo com a sonda, onde a amostra a ser caracterizada encontra-se em sua extremidade. Esse método pode ser subdividido em dois tipos, sendo eles a reflexão com sonda em curto-circuito e a reflexão com sonda em aberto, sendo o último o mais utilizado. A Figura 3 ilustra os dois tipos (KASSEM; VIGNERAS; LUNET, 2010).

Figura 3 – Caracterização por sonda coaxial: (a) aberto e (b) em curto



Fonte: Adaptado de Kassem, Vigneras e Lunet (2010).

Antes de realizar a caracterização dos materiais, esse método necessita de uma calibração, onde são realizadas medições em curto, aberto e com água destilada a 25°C. Para validação da calibração, é utilizada a água destilada a 25°C, para observar se os valores medidos estão de acordo com a literatura. Entre suas vantagens, destaca-se: ser um método não destrutivo, podendo ser utilizada para caracterização em altas temperaturas; e ter a possibilidade de caracterizar o material para uma extensa faixa de frequência de micro-ondas, sendo limitado pelo cabo, sonda e VNA. Esse método é aconselhado para materiais líquidos, semissólidos e sólidos com superfície plana, entretanto, deve ser considerado que a amostra é homogênea em toda a sua extensão (KASSEM; VIGNERAS; LUNET, 2010).

Tecnicamente, trata-se de uma linha de transmissão (cabo coaxial) interligada a uma sonda, onde a mesma deve estar em contato direto com a amostra (não podendo haver ar entre a junção sonda-amostra). Como ocorre descasamento de impedância entre o conjunto cabo-sonda e a amostra, parte da energia é refletida, sendo possível, por meio do VNA, mensurar o coeficiente de reflexão complexo S_{11} (SOUZA; SANTOS, 2015).

As medidas são realizadas pelo VNA, que é conectado a um computador com o *software*, onde é possível extrair, por exemplo, a permissividade complexa do material (KEYSIGHT, 2017). A Figura 4 ilustra o *setup* experimental de medição.

Figura 4 – Setup experimental da caracterização por sonda coaxial



Fonte: Elaboração própria.

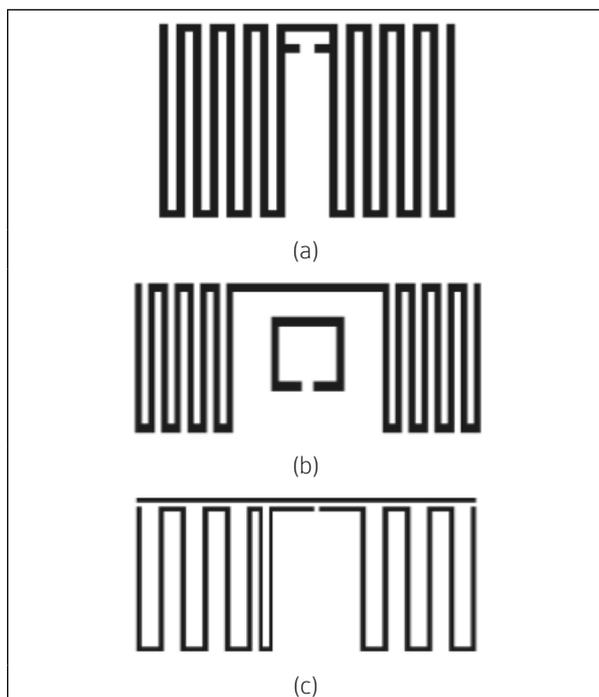
2.5 Antenas para RFID

Conforme demonstrado em Marrocco (2008), existem várias estruturas que podem ser utilizadas como antenas para uma *tag* RFID. Entretanto, um dos maiores desafios desse tipo de estrutura é a sua miniaturização e a largura de banda pois, muitas vezes, no processo de miniaturização da antena, sua largura de banda é comprometida. A largura de banda é um ponto principal no desenvolvimento de *tags* RFID. Apesar dos dispositivos utilizarem bandas estreitas, a sua impedância pode facilmente ser deslocada pelo acoplamento aos objetos etiquetados.

Uma das antenas mais simples para a construção é a do tipo dipolo, sendo constituída de dois elementos em forma de monopolo, sobre um substrato, levemente espaçados (para acomodação do *microchip*) com os elementos funcionando como elementos irradiadores. Entretanto, esse tipo de *layout* possui dimensões consideráveis, o que inviabiliza sua aplicação real. Algumas características são desejadas quando se menciona uma *tag* RFID, entre elas destacam-se o baixo custo, as dimensões pequenas e serem de fácil fabricação.

Uma das estratégias utilizadas para miniaturização das estruturas são os meandros. Essa técnica se constitui, basicamente, em dobrar os dipolos ao longo de sua extensão, com os espaçamentos podendo ser uniformes ou não, como demonstrado na Figura 5.

Figura 5 – Antena de meandro: (a) espaçamento equidistante, (b) acoplamento em loop, (c) com carga em forma de barra



Fonte: Adaptado de Marrocco (2008).

Outro desafio na construção de antenas para o uso em *tags* com *microchip* é o casamento de impedância entre a antena e a impedância do *microchip*. Diferente das tradicionais antenas de microfita, que são construídas, em geral, para serem conectadas em linhas de 50 Ω, as antenas para sistemas RFID devem possuir o conjugado da impedância do *microchip* para que o circuito esteja perfeitamente casado.

O *microchip* apresenta impedância complexa (Z_{ci}), capacitiva, de acordo com o demonstrado na Equação (3). Os parâmetros R_s e X_s representam, respectivamente, a parte real e a parte imaginária da impedância do chip. Portanto, para que ocorra o perfeito casamento de impedâncias e, conseqüentemente, a máxima transferência de energia, a impedância da antena (Z_{ant}) deve ser indutiva, como demonstrado na Equação (4).

$$Z_{ci} = R_s - jX_s \quad (3)$$

$$Z_{ant} = R + jX \quad (4)$$

3 Método da pesquisa

A metodologia empregada neste trabalho é discutida nesta seção e está dividida em duas subseções. A primeira subseção é referente aos procedimentos computacionais aplicados, na qual são abordados os detalhes das simulações realizadas. A segunda subseção trata sobre os procedimentos experimentais efetuados, com a exposição do detalhamento de cada teste experimental realizado.

3.1 Procedimento computacional

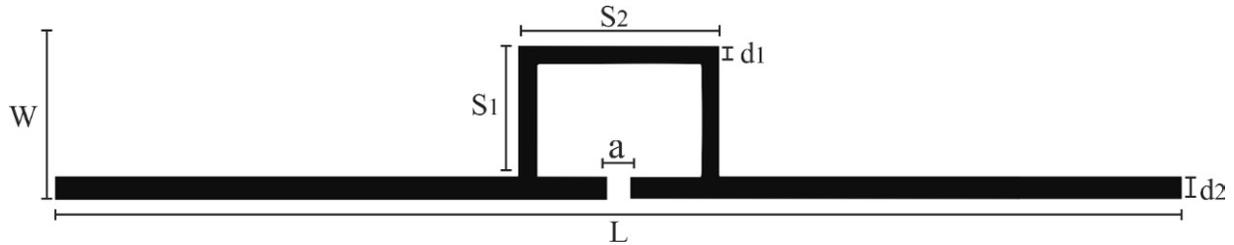
Para a simulação das antenas têxteis, o substrato *jeans* foi utilizado com espessura de 1,2 mm, constante dielétrica $\epsilon_r=2,15$, e tangente de perda de $tg\delta=0,08$, obtidos por meio da caracterização utilizando o método da sonda coaxial. No *path*, foi utilizado o tecido *Pure Copper Polyester Taffeta Fabric*, que possui espessura de 0,08 mm e uma resistência superficial de $0,05 \Omega^2$. O *microchip* utilizado possui uma impedância de $Z_{ci} = 22 - 195\Omega$ e aproximadamente 3 mm de largura. Todas as antenas foram desenvolvidas para operar em 915 MHz. As estruturas foram analisadas e otimizadas utilizando o *software* comercial Ansoft HFSS (*High Frequency Structure Simulator*), produzido e comercializado pela ANSYS *Electronics Desktop*.

As antenas utilizadas para confecção das *tags* foram dos tipos dipolo, dipolo dobrado e meandro sem voltas.

3.1.1 Antena dipolo

Devido a sua fácil construção, o primeiro tipo de antena para RFID foi o dipolo, utilizando as equações demonstradas em Valmiro (2015). Os parâmetros a serem considerados nessa construção, ilustrados na Figura 6, são: o comprimento total da antena, L ; a altura total, W ; o espaçamento entre os monopolos, a ; os comprimentos dos indutores; e as larguras das linhas (microfita) dos indutores, S_1 e S_2 , e dos monopolos, d_1 e d_2 .

Figura 6 – Antena dipolo com indutores.



Fonte: Autoria própria.

Em geral, as antenas dipolo possuem suas dimensões na razão de $\lambda/2$ (meio comprimento de onda) da frequência. De acordo com a Equação (5) é possível descobrir o tamanho do dipolo (L), onde c é a velocidade da luz, no vácuo, e f a frequência de operação (915 MHz).

$$L = \frac{c}{f \cdot 2} = 163,82 \text{ mm} \quad (5)$$

Adotou-se uma largura da linha de 3 mm para o dipolo. Os valores dos indutores, obtidos em nanohenry (nH), são calculados por meio das equações aproximadas de indutores de microfita representada na Equação (6) (VALMIRO, 2015):

$$L = L_0 \cdot K_g \quad (6)$$

, onde, K_g corresponde ao fator de correção que considera a proximidade do plano terra, demonstrado pela Equação (7), e L_0 corresponde ao valor da indutância no espaço livre, demonstrado na Equação (8), l o comprimento do indutor (mm), W a largura do condutor (mm), t a espessura do condutor (mm) e h a espessura do substrato (mm).

$$K_g = 0,57 - 0,145 \cdot \ln \left(\frac{W}{h} \right), \quad \frac{W}{h} > 0,05 \quad (7)$$

$$L_0 = 0,2 \cdot l \cdot \left[\ln \left(\frac{l}{W+t} \right) + 1,193 + 0,2235 \cdot \frac{W+t}{l} \right] \quad (8)$$

A resistência R associada aos indutores é estimada pela Equação (9), com o parâmetro R_s representando a parte real da impedância do *microchip*.

$$R = \frac{R_s \cdot l \cdot K}{2 \cdot (W+t)} \quad (9)$$

O parâmetro K corresponde ao fator de correção que considera o acúmulo de corrente dos condutores, demonstrado na Equação (10).

$$K = 1,4 + 0,217 \cdot \ln \ln \left(\frac{W}{5 \cdot t} \right) \quad (10)$$

$$5 < \frac{W}{t} < 100 \text{ para microfita.}$$

Após calculadas as dimensões dos elementos da antena, por meio das Equações (5)-(10), as parametrizações das medidas da antena dipolo foram realizadas utilizando o *software HFSS* para obter valores mais precisos. As dimensões do modelo simulado e otimizado são demonstradas na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros otimizados da antena dipolo

Parâmetros	Dimensões (mm)
L	238,0
W	20,6
a	3,0
S_1	17,6
S_2	19,1
d_1	2,0
d_2	3,0

Fonte: Autoria própria.

3.1.2 Antena dipolo dobrado

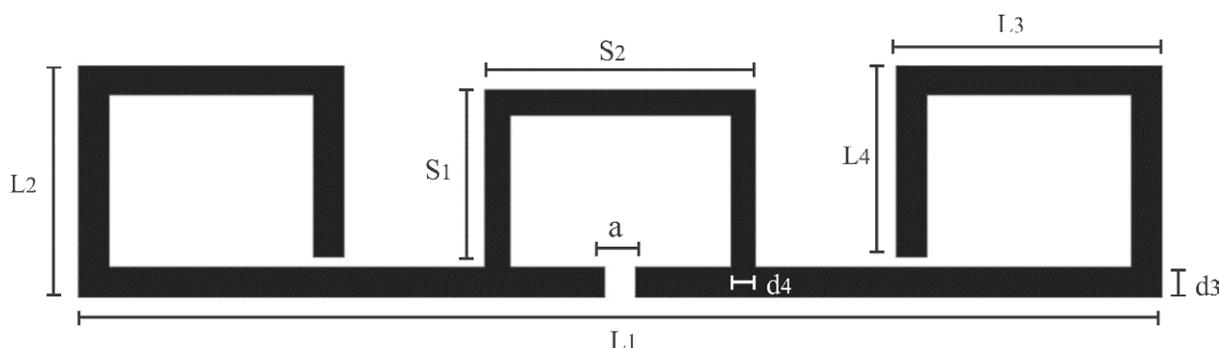
Para a miniaturização da estrutura optou-se por dobrar as extremidades da antena dipolo para a diminuição do comprimento total da antena, procedimento esse também adotado em (VALMIRO,

2015). Similar ao utilizado na antena dipolo, linhas de microfita foram utilizadas realizando o papel de indutores para o casamento de impedância entre o *microchip* e a antena.

Na Figura 7 é ilustrada, a estrutura da antena. No dimensionamento, considera-se: o comprimento total da antena, L_1 ; a altura total, L_2 ; o espaçamento entre

os monopolos, a ; os comprimentos dos indutores, S_1 e S_2 ; as larguras das linhas (microfita) dos monopolos e dos indutores, d_3 , d_4 , respectivamente; e os comprimentos das partes dobradas L_3 e L_4 . Os valores otimizados das dimensões da antena são encontrados na Tabela 2.

Figura 7 – Antena dipolo dobrado.



Fonte: Autoria própria.

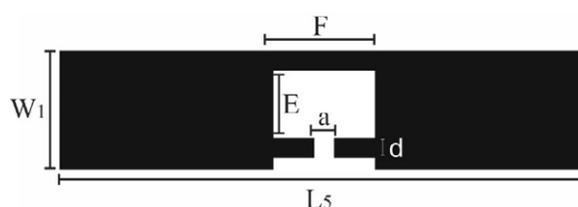
Tabela 2 – Dimensões otimizadas da antena dipolo dobrado

Parâmetros	Dimensões (mm)
L_1	106,1
L_2	23,0
L_3	26,0
L_4	19,0
S_1	17,5
S_2	26,6
a	3,0
d_3	3,0
d_4	2,5

Fonte: Autoria própria.

de impedância, F e E , respectivamente, e a largura da linha de microfita onde o *microchip* será instalado, d . O casamento de impedância é realizado em detrimento da distância da alimentação ao topo da estrutura.

Figura 8 – Antena meandro sem voltas



Fonte: Autoria própria.

Os valores otimizados das dimensões da antena são encontrados na Tabela 3.

Tabela 3 – Dimensões otimizadas da antena de meandro com zero voltas

Parâmetros	Dimensões (mm)
L_5	80,0
W_1	18,0
a	3,0
d	3,0
E	10,2
F	15,4

Fonte: Autoria própria.

3. 1.3 Antena meandro com zero voltas

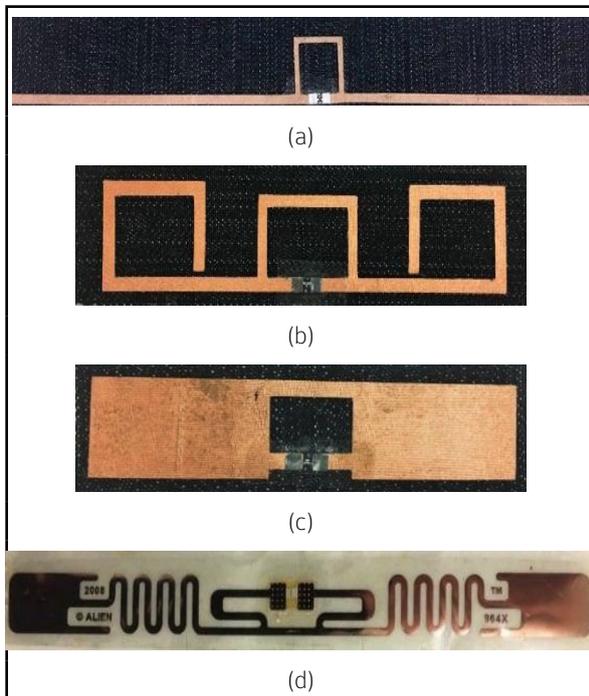
Uma configuração de teste com base em Marrocco (2008) foi realizada com o modelo de miniaturização de meandro. Entretanto, ao contrário do tradicional, ou seja, realizando voltas ao longo da estrutura, o preenchimento total de ambos os lados foi proposto obtendo uma forma mais próxima de um dipolo, conforme demonstrado na Figura 8. Considera-se o comprimento total da antena, L_5 , a altura total, W_1 , o espaçamento para acomodação do *microchip*, a , largura e altura do *slot* responsável pelo casamento

3.2 Procedimento experimental

Com o intuito de validar o desempenho das antenas, protótipos com o tecido *jeans* como substrato e o tecido *Pure Copper Polyester Taffeta Fabric* como elemento radiador foram construídos e, em seguida, testes de alcance máximo foram realizados.

O leitor utilizado foi o FX9500 da Motorola, em conjunto com sua antena ANT 71720-01, fabricada pela Andrew, com ganho de 6 dBi. Para efeito de comparação, foram realizados, sob as mesmas condições, os testes nos protótipos das antenas e em uma antena comercial modelo 964X, fabricada pela Alien. Na Figura 9 são apresentados os protótipos construídos, bem como a antena comercial utilizada na comparação.

Figura 9 – Antenas RFID: (a) Dipolo; (b) Dipolo dobrado; (c) Meandro com zero voltas; (d) Antena comercial

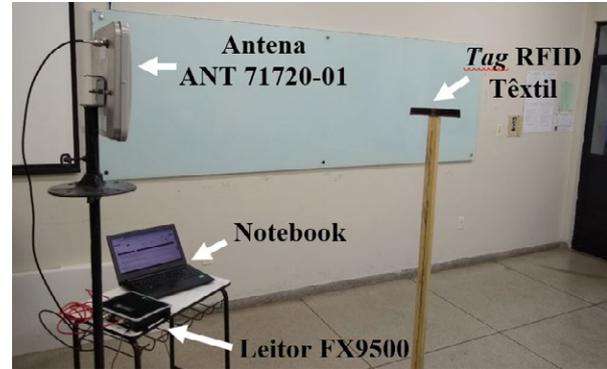


Fonte: Autoria própria.

O *setup* experimental das medições foi montado no Laboratório de Medidas em Telecomunicações do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB). Os testes de leituras foram realizados nas distâncias entre 1 e 5 m, com intervalo de 1 m, entre a antena transmissora e as *tags*. Um total de 10 leituras foram realizadas em cada ponto, onde a média aritmética foi calculada em cada. A Figura 10 mostra o *setup* experimental utilizado nas medições, sendo

possível observar a presença do leitor (sobre a mesa) conectado à antena RFID (suporte à esquerda da foto) e o suporte para fixação das antenas em teste (suporte à direita da foto, em madeira).

Figura 10 – Setup experimental de medições



Fonte: Autoria própria.

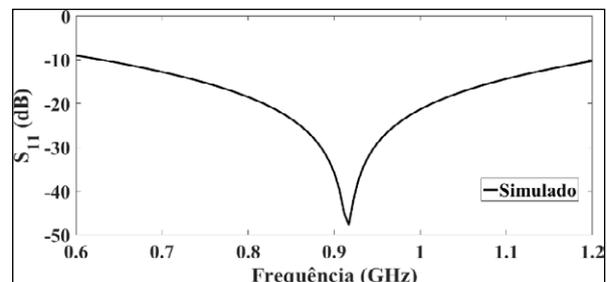
4 Resultados da pesquisa

Nesta seção, os resultados obtidos, tanto por meio das simulações como dos experimentos, são apresentados. Primeiro os resultados das simulações são expostos e discutidos e, em seguida, são apresentados e discutidos os resultados experimentais seguindo os procedimentos realizados em Vieira (2013).

4.1 Resultados das simulações

Na Figura 11, o resultado simulado da magnitude do coeficiente de reflexão, S_{11} , simulado na faixa de frequência entre 0,6 – 1,2 GHz para antena dipolo, é apresentado. É possível verificar que em 915 MHz ocorre a máxima taxa de transferência de potência para o *microchip*, com uma perda de retorno menor que e uma largura de banda em torno de 579 MHz.

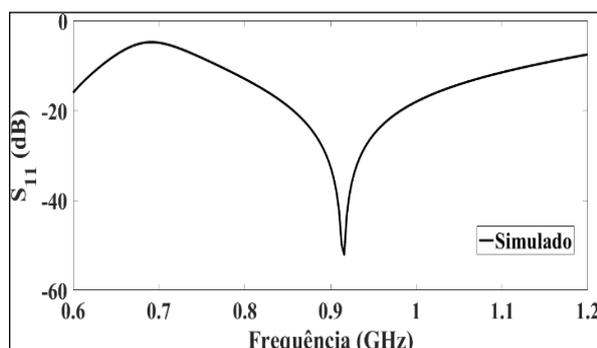
Figura 11 – Magnitude do coeficiente de reflexão antena dipolo



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 12, é possível observar o resultado simulado da magnitude do coeficiente de reflexão, S_{11} , na faixa de frequência entre 0,6 – 1,2 GHz para antena dipolo dobrado. É possível verificar que em 915 MHz ocorre a máxima taxa de transferência de potência para o *microchip*, com uma perda de retorno menor que e uma largura de banda em torno de 366 MHz.

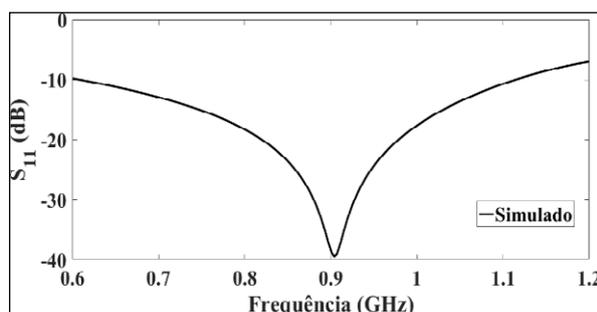
Figura 12 – Magnitude do coeficiente de reflexão antena dipolo dobrado



Fonte: Autoria própria.

Já na Figura 13, pode-se observar o resultado simulado da magnitude do coeficiente de reflexão, S_{11} , na faixa de frequência entre 0,6 – 1,2 GHz para antena meandro com zero voltas. É possível verificar que em 915 MHz ocorre uma boa taxa de transferência de potência para o *microchip*, com uma perda de retorno menor que e uma largura de banda em torno de 507 MHz. Entretanto, a máxima transferência de potência ocorre em 904 MHz com uma perda de retorno de aproximadamente .

Figura 13 – Magnitude do coeficiente de reflexão antena meandro com zero voltas



Fonte: Autoria própria.

Os resultados simulados demonstram que as antenas desenvolvidas no substrato têxtil podem ser utilizadas com chips de RFID/UHF UCODE G2XM da NXP, que funcionam na frequência de 915 MHz e impedância 22-195i.

4.2 Resultados experimentais

Nesta subseção, os resultados experimentais obtidos neste trabalho são apresentados. Inicialmente, uma série de testes de desempenho de leitura foi realizada apenas com o *chip* RFID UCODE G2XM da NXP. Foi observado que não houve leitura dos dados devido a não ativação do *chip*, pois não estavam com as antenas acopladas para que houvesse a ativação. Após o acoplamento dos *chips* às respectivas antenas, o leitor de RFID FX9500 da Motorola realizou, de maneira padronizada, via sistema próprio de testes, uma série de tentativas de leitura das *tags*, seguindo os procedimentos descritos na subseção 3.2.

Na Tabela 4 são ilustrados os resultados das quantidades de leituras obtidas durante os 10 ciclos de busca de duração de 5 s. As *tags* foram posicionadas no intervalo de 1 a 5 metros de distância do leitor RFID. Essas medidas permitem identificar o desempenho das *tags* propostas em comparação com uma *tag* comercial, com o objetivo de comprovar a viabilidade prática das antenas desenvolvidas. É importante ressaltar que quanto maior o número de leituras, maior será o grau de confiabilidade da *tag*. Todas as *tags* testadas foram desenvolvidas tendo como substrato dielétrico o tecido *jeans* e como material condutor o tecido *Pure Copper Polyester Taffetra Fabric*.

Tabela 4 – Comparação das quantidades de leituras obtidas após 10 ciclos de busca do leitor

Distância (m)	Quantidade de leituras dos dados das <i>tags</i>			
	Dipolo	Dipolo dobrado	Meandro com zero voltas	Comercial
1	9693	1851	10415	10707
2	11299	10252	10723	10044
3	9152	1055	8113	10337
4	10117	12624	11245	9823
5	0	0	0	0

Fonte: Autoria própria.

Por meio dos testes realizados, é possível constatar que as antenas dipolo, dipolo dobrado e meandro com zero voltas obtiveram valores semelhantes à antena comercial, podendo ser aplicadas para distâncias de até quatro metros. De acordo com os resultados ilustrados na Tabela 4, pode ser observado que, para a distância de 5 metros, nenhuma das *tags* têxteis desenvolvidas neste trabalho, assim como a *tag* comercial,

apresentou ciclos de leituras. A antena de meandro com zero voltas foi a que obteve melhor relação entre dimensão/alcance, sendo a miniaturização mais compacta a atingir leituras a quatro metros.

5 Conclusão

Este trabalho apresentou os princípios básicos de operação da tecnologia de identificação por rádio frequência RFID, bem como a aplicação desses sistemas em tecido. Também foi realizado um estudo sob a caracterização de materiais, sendo apresentado os principais métodos.

Resultados com três tipos de antenas têxteis desenvolvidas foram apresentados a partir do tecido *jeans* como substrato e do tecido *Pure Copper Polyester Taffeta Fabric* como elemento irradiador, que podem ser aplicadas em *tags* RFID/UHF. Os resultados experimentais ressaltaram o desempenho satisfatório das etiquetas RFID/UHF propostas, quando comparadas à antena comercial.

O principal desafio na construção das etiquetas RFID/UHF foi a obtenção do casamento de impedância entre o *microchip* e a antena. Esse casamento é necessário para que ocorra a máxima transferência de energia entre a antena e o *chip*.

A miniaturização da antena também se trata de um fator importante, pois é um grande desafio manter características desejadas, como a largura de banda, o ganho e o alcance das leituras das etiquetas, no processo de miniaturização.

Como sugestões para trabalhos futuros, podem ser realizados testes de impedância das antenas construídas, testes de sensibilidade das antenas medindo o nível mínimo para ativação das mesmas e construção de novas estruturas, a fim de miniaturizar a antena.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) por fomentar esta pesquisa.

REFERÊNCIAS

AHMED, S. *et al.* Comparison of wearable e-textile split ring resonator and slotted patch RFID reader antennas embedded in work gloves. **IEEE Journal of Radio Frequency Identification**, v. 3, n. 4, p. 259-264, 2019.

BALANIS, C. A. **Antenna theory: analysis and design**. 3. ed. Hoboken: Wiley, 2005.

CAVALCANTE, G. A. **Desenvolvimento de circuitos planares sobre substratos têxteis**. 2014. 115 f. Tese (Doutorado em Automação e Sistemas; Engenharia de Computação; Telecomunicações) – Universidade Federal do Rio Grande, Natal (Brasil), 2014.

EL-HADIDY, M.; YASSER, Y. E. S. B. Realistic chipless RFID tag modeling, mathematical framework and 3D EM simulation. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON RFID TECHNOLOGY AND APPLICATIONS (RFID-TA), 10, 2019, Pisa. **Proceedings...** Pisa: IEEE, 2019. p. 201-206.

FU, Y. Y. *et al.* Experimental study on the washing durability of electro-textile UHF RFID tags. **IEEE Antenna and Wireless Propagation Letters**, v. 14, p. 446-469, 2015.

HOLANDA, S. M. **Estudo e desenvolvimento de antenas de microfita utilizando tecido de malha a base de fibras têxteis compostas**. 2016. 142 f. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Comunicação e Automação) - Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró (Brasil), 2016.

JEONG, I. C.; BYCHKOV, D.; SEARSON, P. C. Wearable devices for precision medicine and health state monitoring. **IEEE Transactions on Biomedical Engineering**, v. 66, n. 5, p. 1242-1258, 2019.

KARMAKAR, N. C. **Handbook of smart antennas for RFID systems**. Hoboken: Wiley, 2010.

KASSEM, H.; VIGNERAS, V.; LUNET, G. Characterization techniques for materials' properties measurement. In: MININ, I. (Ed.) **Microwave and millimeter wave technologies from photonic bandgap design to antenna and applications**. London (United Kingdom): IntechOpen. cap. 13, 2019.

KEYSIGHT. **Dielectric probe kit 200 MHz to 50 GHz - technical overview**, 2017. Disponível em: <<https://bit.ly/2VQWfzM>>. Acesso em: abr. 2020.

LAJEVARDI, M. E.; KAMYAB, M. Ultraminiaturized metamaterial-inspired SIW textile antenna for off-body applications. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**, v. 16, p. 3155-3158, 2017.

LEE, H.; TAK, J.; CHOI, J. Wearable antenna integrated into military berets for indoor/outdoor positioning system. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**, v. 16, p. 1919-1922, 2017.

MARROCCO, G. The art of UHF RFID antenna design: impedance-matching and size-reduction techniques. **IEEE Antennas and Propagation Magazine**, v. 50, n. 1, p. 66-79, 2008.

PARK, S.; JAYARAMAN, S. Smart textile-based wearable biomedical systems: a transition plan for research to reality. **IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine**, v. 14, n. 1, p. 86-92, 2010.

POZAR, D. M.; SCHAUBER, D. H. **Microstrip antennas: analysis and design of microstrip antennas and arrays**. Piscataway: Wiley/IEEE Press, 1995.

SILVA JUNIOR, P. F. S. *et al.* Wearable textile bioinspired antenna for 2G, 3G, and 4G systems. **Microwave and Optical Technology Letters**, v. 58, n. 12, p. 2818-2823, 2016.

SOUZA, D. H. S.; SANTOS, J. C. A. Modelos de admitância e esquemas de extração de permissividade. In: CONGRESO IBEROAMERICANO DE ESTUDIANTES DE INGENIERÍA ELÉCTRICA (CIBIELEC), 6, 2015, Merida. **Memórias...** Merida: Universidad Central de Venezuela (UCV), 2015.

TENNANT, A.; HURLEY, W.; DIAS, T. Experimental knitted, textile frequency selective surfaces. **Electronics Letters**, v. 48, n. 22, p. 1386-1388, 2012.

UKKONEN, L.; SYDÄNHEIMO, L.; RAHMAT-SAMII, Y. Sewed textile RFID Tag and sensor antennas for on-body use. In: EUROPEAN CONFERENCE ON ANTENNAS AND PROPAGATION (EuCAP), 6, 2012, Prague. **Proceedings...** Prague: IEEE, 2012. p. 1-3. v. 6, p. 3450-3454.

VALERO, E.; ADÁN, A.; CERRADA, C. Evolution of RFID applications in construction: a literature review. **Sensors**, n. 15, n. 7, p. 15988-16008, 2015.

VALMIRO, R. **Antenas para sistemas RFID impressas em substrato flexível**. 2015. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) -Escola Politécnica da Universidade São Paulo, São Paulo (Brasil), 2015.

VIEIRA, J. M. *et al.* Análise do sistema RFID para monitoração de equipamentos de laboratórios. **Principia**, João Pessoa, n. 22, p. 23-27, 2013.

WANG, K.-H.; LI, J.-S. Jeans textile antenna for smart wearable antenna. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ANTENNAS, PROPAGATION AND EM THEORY (ISAPE), 12, 2018, Hangzhou. **Proceedings...** Hangzhou: IEEE, 2018. p. 1-3.

WU, J. X.; LI L. An introduction to wearable technology and smart textiles and apparel: terminology, statistics, evolution, and challenges. In: DONG, X. (ed.) **Smart and Functional Soft Materials**. London: IntechOpen. cap. 6. 2019.