



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

RELATÓRIO DE ESTÁGIO SUPERVISIONADO  
LABORATÓRIO DE RADIOMETRIA

SAMUEL MEDEIROS ARAÚJO MORAIS

CAMPINA GRANDE – PB  
MARÇO DE 2018

SAMUEL MEDEIROS ARAÚJO MORAIS

RELATÓRIO DE ESTÁGIO SUPERVISIONADO  
LABORATÓRIO DE RADIOMETRIA

*Relatório de estágio supervisionado 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:

Professor Alexandre Jean René Serres, D. Sc.

Campina Grande – PB

Março de 2018

SAMUEL MEDEIROS ARAÚJO MORAIS

RELATÓRIO DE ESTÁGIO SUPERVISIONADO  
LABORATÓRIO DE RADIOMETRIA

*Relatório de estágio supervisionado 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

---

Professor Alexandre Jean René Serres, D. Sc.  
Orientador, UFCG

Dedico este trabalho a toda a minha família e  
amigos, que me acompanharam durante essa  
jornada.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por permitir que tudo ocorresse da melhor maneira e por me capacitar para chegar até aqui.

A toda a minha família: meus pais, Oriel e Maria do Desterro; meus irmãos, Gabrielly e Fillipe; meus avós Moaci, Cândida e Maria de Lourdes; meus tios, Mahra e Leiliano, e meus primos, Maria Ritha e João Pedro. Obrigado por sempre me apoiarem em tudo (e por me aturarem todos os dias). Amo muito todos vocês.

Ao meu orientador Prof. Alexandre Serres, pela paciência, dedicação e todas as oportunidades e orientações concedidas ao longo desses últimos anos. E ao supervisor deste estágio, Prof. Edmar Candeia Gurjão, por ter me acolhido ao Laboratório de Radiometria e por sempre instigar nossa curiosidade.

Aos meus amigos e colegas do curso de Engenharia Elétrica e também a toda a equipe que faz o Departamento de Engenharia Elétrica da UFCG, por todo o trabalho árduo.

Ao Prof. Joabson Nogueira, do IFPB de João Pessoa, pela colaboração e disponibilidade em contribuir com este trabalho.

Finalmente a todos que, de alguma forma, fizeram parte dessa história comigo. Sou eternamente grato a todos vocês.

*“Se, a princípio, a ideia não é absurda, então não há esperança para ela.”*

Albert Einstein

## RESUMO

Este trabalho apresenta o relatório das atividades realizadas pelo aluno Samuel Medeiros Araújo Moraes durante o Estágio Supervisionado no Laboratório de Radiometria localizado no Departamento de Engenharia Elétrica (DEE) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), sob a orientação do Professor Alexandre Jean René Serres e a supervisão do Professor Edmar Candeia Gurjão. O estágio consistiu em analisar o uso de uma borracha de Etileno-Propileno-Dieno (EPDM) como substrato na fabricação de uma etiqueta RFID flexível para utilização na frequência UHF americana de 915 MHz. As simulações foram feitas utilizando-se o software *Electronics Desktop* da ANSYS® e, após a fabricação da etiqueta, foram feitos testes para validar sua aplicabilidade.

**Palavras-chave:** EPDM, etiqueta RFID flexível, fabricação, testes.

## ABSTRACT

This work presents a report of the activities developed by the student Samuel Medeiros Araújo Morais during the Supervised Internship at the Radiometry Laboratory located in the Department of Electrical Engineering (DEE) of the Federal University of Campina Grande (UFCG), under the guidance of Professor Alexandre Jean René Serres and supervision of Professor Edmar Candeia Gurjão. The internship consisted in analyzing the use of a Ethylene Propylene Diene Monomer (EPDM) rubber as substrate to fabricate a RFID flexible tag to operate in the American UHF frequency of 915 MHz. The software ANSYS® Electronics Desktop was used for simulations and, after its fabrication, the tag was tested to validate its applicability.

**Keywords:** EPDM, RFID flexible tag, fabrication, tested.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistema RFID básico.....	14
Figura 2 – Procedimentos para concepção de uma etiqueta RFID flexível.....	16
Figura 3 – Exemplo de estrutura para etiqueta RFID em substrato flexível.....	17
Figura 4 – Fita de cobre adesivo condutor.....	18
Figura 5 – Manta da borracha de EPDM.....	19
Figura 6 – Curva da permissividade dielétrica (Teste 1).....	20
Figura 7 – Curva da permissividade dielétrica (Teste 2).....	20
Figura 8 – Estrutura da etiqueta proposta.....	23
Figura 9 – Modelo 3D (a) e vista lateral (b) da etiqueta.....	24
Figura 10 – Coeficiente de reflexão (S11) da etiqueta.....	25
Figura 11 – Impedância de entrada da etiqueta.....	25
Figura 12 – Variação do coeficiente de reflexão (S11) da etiqueta em função do parâmetro a.....	26
Figura 13 – Variação do coeficiente de reflexão (S11) da etiqueta em função do parâmetro d.....	26
Figura 14 – Corte do cobre adesivo na Silhouette Cameo.....	27
Figura 15 – Aplicação do cobre adesivo sobre a manta de borracha.....	27
Figura 16 – Corte manual da etiqueta.....	28
Figura 17 – Protótipo final da etiqueta (a = 7,5mm).....	28
Figura 18 – Protótipo final da etiqueta (b = 2mm).....	29
Figura 19 – Protótipo final da etiqueta (plano refletor).....	29
Figura 20 – Setup de medição com a etiqueta na posição horizontal.....	30
Figura 21 – Setup de medição com a etiqueta na posição vertical.....	30

## LISTA DE TABELAS

Tabela I – Características da fita de cobre adesivo... ..	18
Tabela II – Permissividade e tangente de perdas em função da frequência.....	20
Tabela III – Valores dos parâmetros da estrutura proposta.....	23
Tabela IV – Resultados da medição a uma distância $DIST = 55\text{cm}$ .....	31
Tabela V – Resultados da medição a uma distância $DIST = 65\text{cm}$ .....	31
Tabela VI – Resultados da medição a uma distância $DIST = 75\text{cm}$ .....	32

# SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	11
1.1 LABORATÓRIO DE RADIOMETRIA.....	11
1.2 OBJETIVOS.....	12
1.2.1 OBJETIVO GERAL.....	12
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	12
1.3 METODOLOGIA.....	13
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	14
2.1 IDENTIFICAÇÃO POR RADIOFREQUÊNCIA.....	14
2.2 RFID COM ETIQUETAS FLEXÍVEIS.....	16
2.3 COBRE ADESIVO CONDUTOR.....	18
2.4 BORRACHA DE EPDM.....	19
2.5 ANSYS® ELECTRONICS DESKTOP.....	21
3. SIMULAÇÕES REALIZADAS.....	23
4. FABRICAÇÃO DA ETIQUETA.....	27
5. TESTES E RESULTADOS.....	30
6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	33
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	34

# 1. INTRODUÇÃO

A utilização de materiais flexíveis tem ganhado bastante espaço na área de fabricação de antenas devido a características como compacidade e maior durabilidade que essas antenas possuem em relação às de material rígido. Além disso, o uso desses materiais como substrato permite utilizar essas antenas nas mais diversas aplicações como, por exemplo, em roupas ou mesmo sobre o corpo humano.

Conseqüentemente, o desenvolvimento de uma antena flexível requer mais atenção no sentido de que os processos envolvidos na sua fabricação são diferentes dos convencionais [1]. Os materiais precisam ser escolhidos de acordo com a aplicação e as características do ambiente onde serão utilizados, de forma a evitar degradação e possível comprometimento dos resultados; após a escolha dos materiais, é necessário obter as características elétricas destes, para a partir daí projetar a antena, confeccioná-la e realizar os testes.

Neste trabalho é apresentado o procedimento de concepção de uma etiqueta RFID em material flexível (borracha de EPDM) para operar na faixa UHF (902 – 928 MHz). As simulações foram feitas no software *Electronics Desktop* da ANSYS®, o qual contém as ferramentas de simulação 2D (*Ansoft Designer*) e 3D (HFSS).

Este trabalho está organizado da seguinte forma: a seguir nesta seção, será comentado sobre o Laboratório de Radiometria (local onde o estágio foi realizado), os objetivos deste trabalho e a metodologia aplicada; na seção 2 encontra-se uma fundamentação teórica acerca do tema e informações sobre os materiais utilizados; nas seções 3 e 4 serão discutidos os procedimentos de simulação e fabricação da etiqueta, respectivamente; na seção 5 os testes realizados e os resultados obtidos com eles; e, finalmente nas seções 6 e 7, a conclusão e referências utilizadas.

## 1.1 LABORATÓRIO DE RADIOMETRIA

O estágio supervisionado foi realizado no Laboratório de Radiometria, localizado no Bloco CJ do Departamento de Engenharia Elétrica (DEE) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), estando sob a coordenação do professor Dr. Alexandre Jean René Serres.

O laboratório conta com seis computadores funcionando com os sistemas operacionais Windows e Linux e todos com acesso à internet, além de licenças de softwares de simulação

eletromagnética como o *Ansoft Designer* e o *High Frequency Electromagnetic Field Simulation* (HFSS) da ANSYS® e o *Advanced Design System* (ADS) da Keysight®. A bancada conta com equipamentos para medição até a frequência de 8,5 GHz.

São desenvolvidos neste laboratório pesquisas de iniciação científica e pós-graduação, além de trabalhos de conclusão de curso e estágios, seguindo cinco linhas de pesquisa principais:

- Coleta de energia;
- Dispositivos de radiofrequência;
- Metamateriais;
- Modelagem computacional de efeitos eletromagnéticos;
- RFID e sensoriamento.

O estágio aqui relatado foi realizado entre os dias 30 de outubro de 2017 e 23 de fevereiro de 2018, com uma carga horária semanal de 18 horas, totalizando 210 horas, atendendo aos requisitos previstos na Resolução N° 01/2012 do Colegiado do Curso de Graduação de Engenharia Elétrica em consonância com a Lei do Estágio (Lei N° 11.788/2008).

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver uma etiqueta RFID UHF em substrato flexível para operar na frequência de 915 MHz.

### 1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Pesquisa bibliográfica sobre a fabricação de etiquetas RFID passivas em substratos flexíveis;
- Desenvolver antena casada com as características do chip escolhido para confecção (simulações);
- Implementar fisicamente as etiquetas;
- Realizar testes com as etiquetas e validação do seu funcionamento;

### 1.3 METODOLOGIA

A metodologia empregada neste trabalho envolveu a realização de pesquisa e atualização bibliográfica sobre o tema proposto.

No início foram investigadas técnicas e geometrias de etiquetas RFID UHF em substratos flexíveis via pesquisa bibliográfica. As estruturas foram simuladas utilizando o software *Electronics Desktop* da ANSYS® no intuito de obter uma forma geométrica de melhor eficiência.

Em paralelo foi feito o levantamento e a aquisição do material necessário para a produção das etiquetas (chip, substrato, entre outros), bem como sua caracterização. Após a escolha do chip disponível a ser utilizado, as simulações foram focadas no casamento de impedâncias entre o chip e a antena.

Em seguida, a etiqueta foi produzida e os testes foram realizados de forma a verificar a aplicabilidade da mesma.

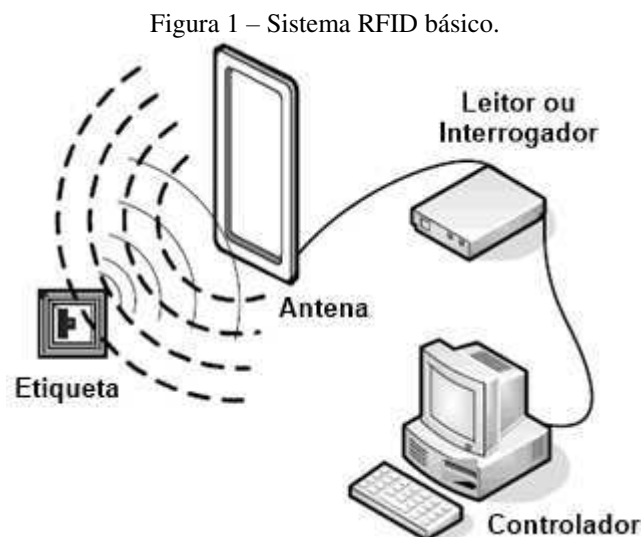
## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção será apresentada a fundamentação teórica necessária para o encaminhamento do trabalho. Primeiramente, uma visão geral sobre o RFID e a utilização de materiais flexíveis para fabricação das etiquetas. Em seguida, serão apresentadas informações sobre os materiais escolhidos para a confecção da etiqueta proposta neste trabalho e o software utilizado para a sua simulação.

### 2.1 IDENTIFICAÇÃO POR RADIOFREQUÊNCIA

A tecnologia de Identificação por Radiofrequência (RFID) é uma das principais aplicações do fenômeno do retroespalhamento (*backscattering*), segundo o qual a reflexão das ondas de rádio pode ser utilizada para identificação e localização. O princípio de um sistema RFID é colocar sobre o objeto a ser identificado um marcador chamado de etiqueta (no inglês, *tag*), o qual contém as informações relevantes à aplicação. Além da etiqueta, o sistema RFID é composto também por um leitor (ou interrogador) e um controlador.

Os leitores são basicamente pequenos computadores compostos por uma antena, uma interface RF (para comunicar-se com a etiqueta) e uma unidade de controle (para comunicar-se com o controlador). Eles são responsáveis por receber o sinal vindo da etiqueta e passá-lo para o controlador. O controlador, por sua vez, é responsável por fazer o tratamento dos dados recebidos e extrair a informação enviada [2]. A Figura 1 mostra a estrutura básica de um sistema RFID.



Fonte: adaptado de [3].

As etiquetas RFID podem ou não conter um chip. Nas etiquetas com chip, este é responsável por armazenar os dados que modularão o sinal refletido para o leitor. A impedância de entrada da antena da etiqueta é projetada de acordo com o chip utilizado na fabricação. Se a impedância do chip é  $(X - jY)$ , a impedância de entrada da antena deve ser o mais próximo possível do conjugado desse valor  $(X + jY)$ , de forma a garantir o casamento de impedâncias e a máxima transferência de potência. Já nas etiquetas sem chip, o sinal é modulado de acordo com a própria geometria da antena, a qual funciona como um filtro para determinadas frequências.

De acordo com a presença ou não de bateria, as etiquetas podem ser classificadas como:

- Ativas: possuem fonte de alimentação própria;
- Passivas: não possuem fonte de alimentação própria, sendo alimentadas pelo sinal vindo do leitor.

A tecnologia RFID possui diversas vantagens quando comparada ao código de barras ou ao código QR como, por exemplo, não ser necessária a visada direta entre o leitor e a etiqueta e a possibilidade de identificação de múltiplos objetos simultaneamente [4]. No entanto, a grande desvantagem do RFID em relação a esses outros sistemas é o custo – a título comparativo, enquanto uma etiqueta RFID custaria em torno de US\$0,10, o código de barras custaria cerca de US\$0,05 [5] –, o que torna sua utilização em larga escala ainda inviável.

Dependendo da frequência de operação, os sistemas RFID podem ser divididos em quatro grupos: *Low Frequency* (LF), *High Frequency* (HF), *Ultra High Frequency* (UHF) e *MicroWave* (MW). Os dois primeiros grupos utilizam campos próximos e acoplamento indutivo para realizar a comunicação e o alcance de leitura é pequeno. Já os dois últimos grupos, utilizam acoplamento eletromagnético para sua comunicação e possuem alto alcance de leitura, podendo chegar até 100 metros. Dentre estes últimos, o sistema UHF é preferível, já que permite a utilização de etiquetas passivas o que contribui para a redução do custo de aplicação [6,7].

A qualidade do sinal recebido é uma das principais preocupações em qualquer sistema de comunicação. Ela pode ser expressa por um parâmetro conhecido como RSSI (*Received Signal Strength Indicator*), que relaciona a potência desse sinal recebido ( $P_{rec}$ ) com uma potência de referência ( $P_{ref}$ ), geralmente de 1mW.

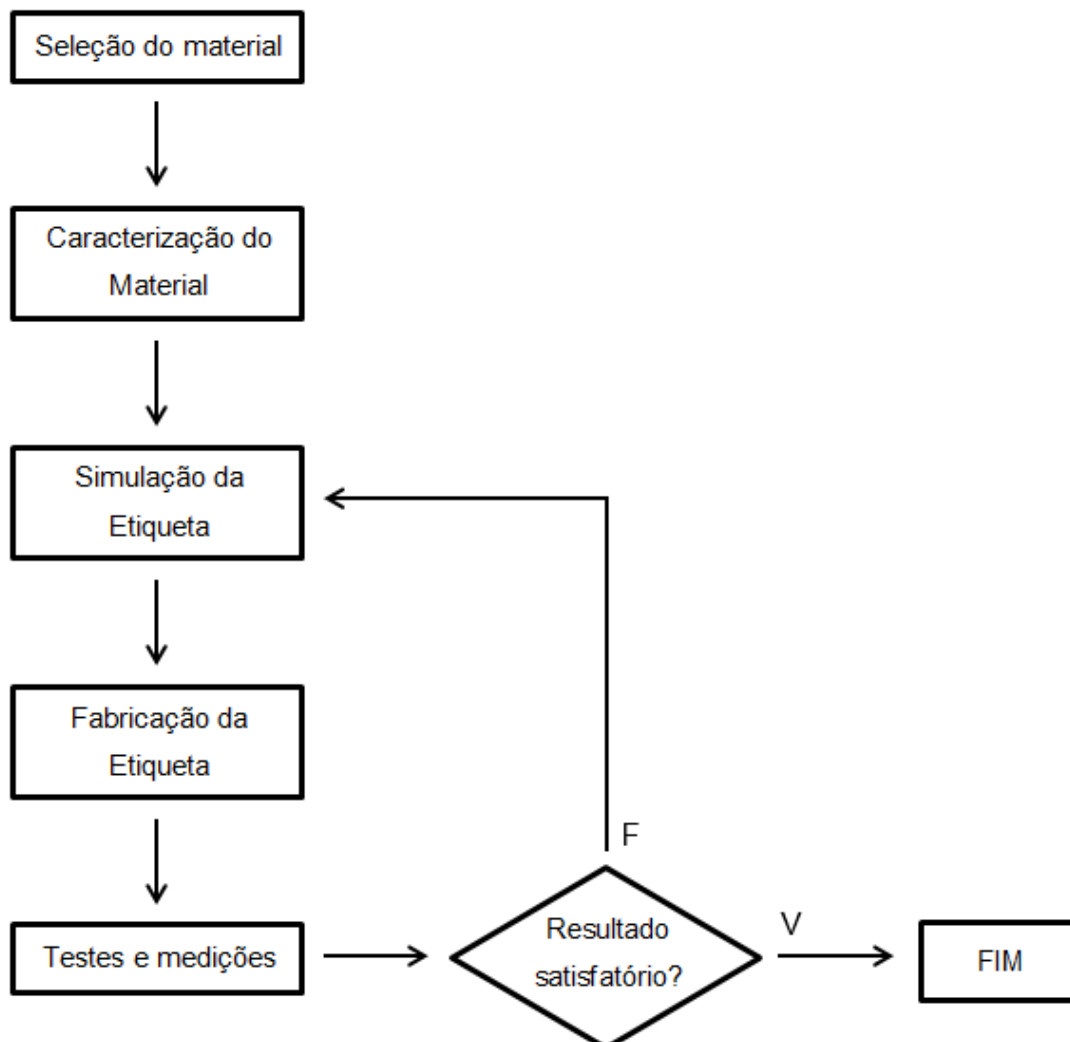
$$RSSI = 10 \log \left( \frac{P_{rec}}{P_{ref}} \right)$$



## 2.2 RFID COM ETIQUETAS FLEXÍVEIS

As etiquetas flexíveis estão ganhando grande popularidade devido a gama de aplicações possíveis para elas, bem como pela sua capacidade de promover compacidade, flexibilidade e durabilidade aos sistemas [1]. No entanto, a concepção dessas etiquetas muitas vezes envolve a utilização de materiais não comuns no contexto de fabricação de antenas, o que requer do fabricante uma maior atenção durante a etapa de projeto. A Figura 2 mostra a sequência de procedimentos básicos para concepção de uma etiqueta RFID flexível.

Figura 2 – Procedimentos para concepção de uma etiqueta RFID flexível.



Fonte: adaptado de [1].

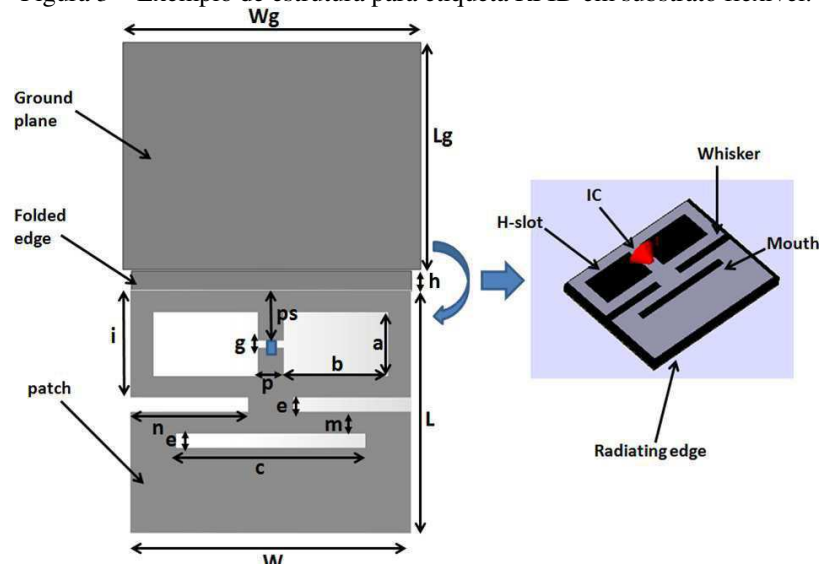
Primeiramente é feita a seleção dos materiais mais adequados à aplicação e ao ambiente onde serão colocadas as etiquetas, de forma a evitar possíveis degradações que venham a afetar seu desempenho a curto prazo. Depois, os materiais selecionados devem ser

caracterizados para obter algumas de suas principais propriedades elétricas, como: permissividade, tangente de perdas, condutividade, resistividade, etc. Com essas propriedades conhecidas, é possível realizar as simulações da etiqueta no intuito de definir a geometria que promove o melhor casamento de impedâncias com o chip selecionado. Em seguida, a etiqueta é fabricada e são realizados os processos de medição e, se necessário, aperfeiçoamento das etiquetas.

Para a etiqueta proposta neste trabalho, foi escolhida como substrato a borracha de EPDM e como material condutor, para ser colocado sobre a borracha, uma fita de cobre adesivo.

Em [8], a borracha de EPDM é utilizada como substrato para a fabricação de uma etiqueta RFID para aplicação sobre o corpo humano. A estrutura da etiqueta, ilustrada na Figura 3 abaixo, apresenta um *slot* principal em forma de “H”, cuja variação das suas dimensões permite melhorar o casamento de impedâncias entre a antena e o chip. Além disso, o plano de terra presente na etiqueta contribui para promover o desacoplamento com o corpo humano e evitar a degradação do desempenho da etiqueta.

Figura 3 – Exemplo de estrutura para etiqueta RFID em substrato flexível.



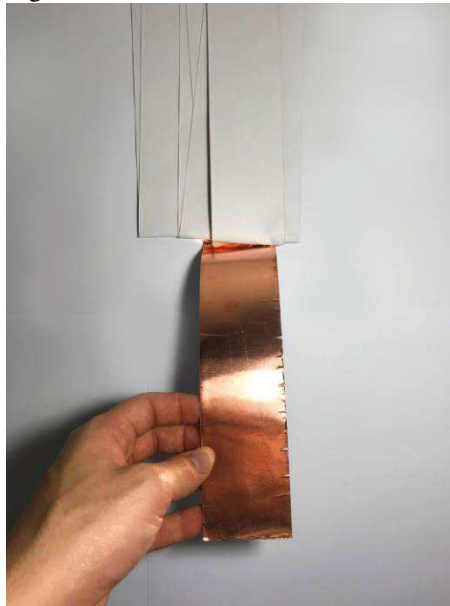
Fonte: [8].

A seguir, serão apresentadas algumas informações e propriedades características desses materiais.

### 2.3 COBRE ADESIVO CONDUTOR

A fita de cobre adesivo condutor (Figura 4) é normalmente utilizada para aplicações que requerem excelente condutividade elétrica. Os usos mais comuns incluem aterramento e blindagem contra interferência eletromagnética em equipamentos, componentes, ambientes blindados, etc. A fita de cobre permite solda e resiste à oxidação e descoloração [9].

Figura 4 – Fita de cobre adesivo condutor.



Muitos fatores determinam a blindagem efetiva proporcionada pela fita, como: espessura, tipo de adesivo, aderência, suavidade da superfície de aplicação, potência e frequência do sinal interferente [9]. A Tabela I resume algumas das características da fita utilizada neste trabalho.

Tabela I – Características da fita de cobre adesivo.

<b>Propriedades</b>	<b>Valores típicos</b>
Espessura do adesivo	0,03mm
Espessura total (adesivo + base)	0,066mm
Aderência ao aço	3,8 N/10mm
Resistência elétrica do adesivo	0,005 ohm

Fonte: [9].

## 2.4 BORRACHA DE EPDM

O EPDM (borracha de monômero de etileno-propileno-terpolímero) é um tipo de borracha sintética com uma extensa gama de aplicações. O E é relativo ao etileno, o P a propileno, o D a dieno e o M a sua classificação pela norma ASTM D-1418 [10].

A borracha de EPDM é utilizada na indústria automobilística (tubos e mangueiras para radiadores, por exemplo), na indústria de caixilharia e em muitas outras devido a sua grande resistência a intempéries. Além disso, é muito utilizada também em membranas de borracha para telhados, isoladores e vedantes diversos [11].

Algumas vantagens da borracha de EPDM [10]:

- Grande resistência ao calor e a radiação ultravioleta (UV);
- Alta flexibilidade a baixas temperaturas;
- Adequada para aplicações no exterior.

A Figura 5 mostra a manta de EPDM utilizada para fabricação da etiqueta neste trabalho:

Figura 5 – Manta da borracha de EPDM.



A caracterização da borracha foi feita no laboratório do Instituto Federal da Paraíba (IFPB), Campus de João Pessoa, para determinar a sua permissividade dielétrica e tangente de perdas. Dois testes foram realizados, para aumentar a confiabilidade do resultado, obtendo-se

as curvas da permissividade do material na faixa de 100 MHz a 2 GHz apresentadas nas Figuras 6 e 7 a seguir.

Figura 6 – Curva da permissividade dielétrica (Teste 1).

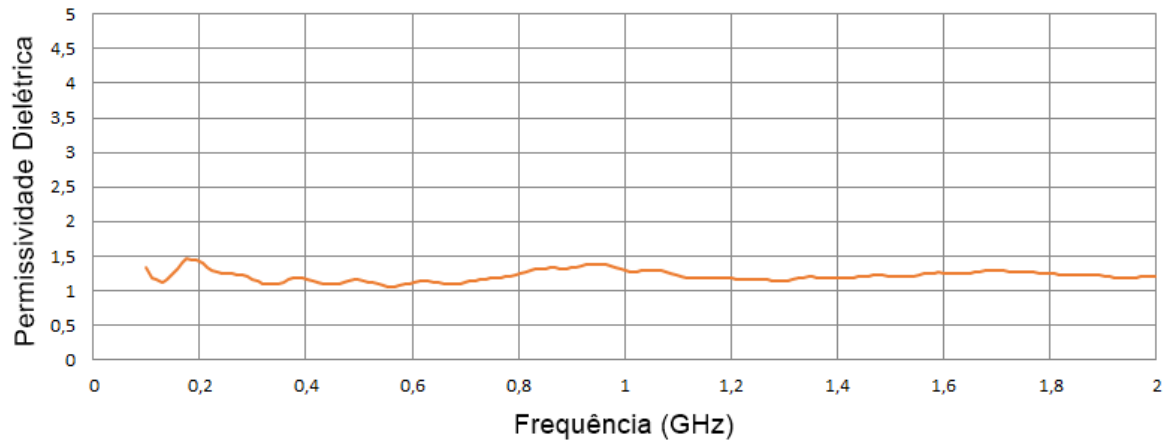
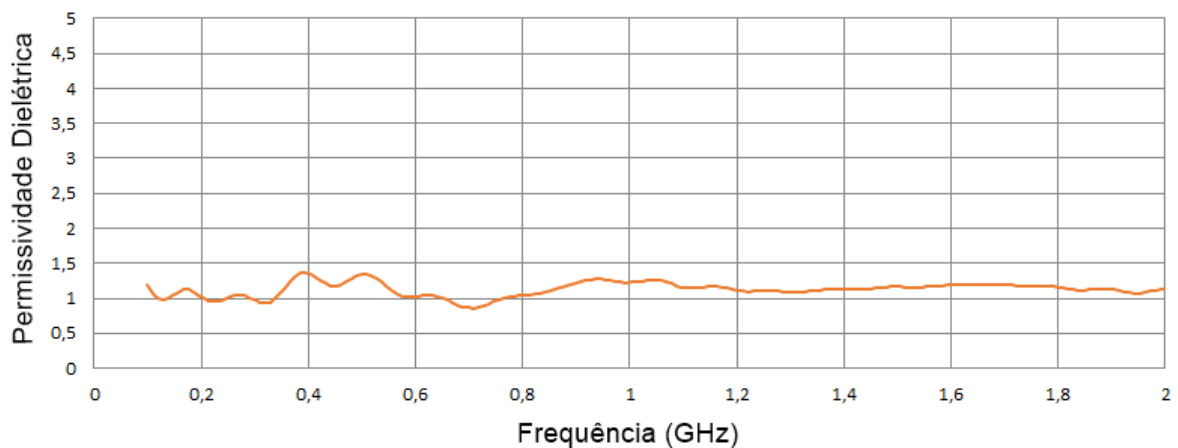


Figura 7 – Curva da permissividade dielétrica (Teste 2).



Com as tabelas de valores fornecidas pelos testes (Tabela II), foi feita uma interpolação linear dos valores obtidos em cada um para encontrar uma aproximação para a permissividade e para a tangente de perdas na frequência de operação de 915 MHz.

Tabela II – Permissividade e tangente de perdas em função da frequência.

<b>Teste 1</b>		<b>Teste 2</b>		<b>tgσ</b>
Frequência	$\epsilon_r$	Frequência	$\epsilon_r$	
907,5 MHz	1,3387	907,5 MHz	1,2365	0,0112
917 MHz	1,3533	917 MHz	1,2542	0,0051

Para o teste 1:

$$\frac{917 - 907,5}{1,3533 - 1,3387} = \frac{917 - 915}{1,3533 - \varepsilon_{r_1}}$$

$$\varepsilon_{r_1} = 1,3502$$

Para o teste 2:

$$\frac{917 - 907,5}{1,2542 - 1,2365} = \frac{917 - 915}{1,2542 - \varepsilon_{r_2}}$$

$$\varepsilon_{r_2} = 1,2505$$

Calculando a média entre esses valores, obtemos:

$$\varepsilon_r = \frac{1,3502 + 1,2505}{2} = 1,30$$

Já para a tangente de perdas, temos que:

$$\frac{917 - 907,5}{0,0051 - 0,0112} = \frac{917 - 915}{0,0051 - \operatorname{tg}\sigma}$$

$$\operatorname{tg}\sigma = 0,0064$$

## 2.5 ANSYS® ELECTRONICS DESKTOP

O *Electronics Desktop* da ANSYS® é uma plataforma unificada de simulação eletromagnética, de circuitos e de sistemas. Essa ferramenta integra diversas aplicações da ANSYS® como o *Ansoft Designer* para simulações de estruturas em duas dimensões e o *High Frequency Electromagnetic Field Simulation* (HFSS) para modelagem em três dimensões [12].

Com essa plataforma, os engenheiros podem analisar com precisão a integridade de sinal e potência, além de problemas de interferência eletromagnética (IEM) em um simples

esquemático. Isso permite o ajuste de muitos parâmetros no início do projeto, antes dos custos de fabricação serem incorridos [13].

Todas as ferramentas computacionais de simulação eletromagnética, para resolver as equações de Maxwell, discretizam o espaço usando um dos métodos a seguir:

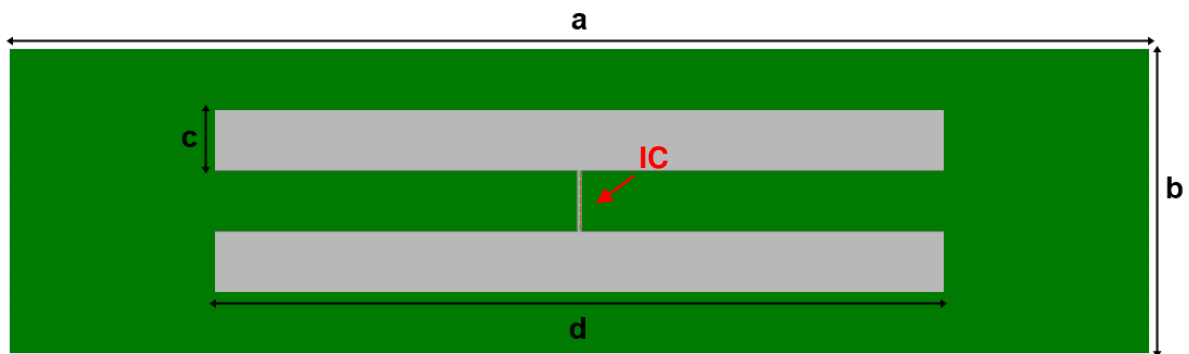
- Método dos elementos finitos (*Finite Element Method* ou FEM);
- Método diferencial finito no domínio do tempo (*Finite-Difference Time-Domain Method* ou FDTD);
- Método dos momentos (*Method of Moments* ou MoM).

A escolha do método influencia na precisão dos resultados finais. Para as simulações em duas dimensões, o *Ansoft Designer* utiliza o método dos momentos e para as simulações em três dimensões, o HFSS utiliza o método dos elementos finitos [14].

### 3. SIMULAÇÕES REALIZADAS

A estrutura da etiqueta proposta neste trabalho encontra-se na Figura 8 a seguir, onde foi usada a técnica de casamento com um *slot* em forma de “H” indicada em [8, 15]. A região verde representa o cobre adesivo condutor, enquanto a região cinza representa o substrato de EPDM. O slot indicado por IC (*Integrated Circuit*) representa o local onde será soldado o chip.

Figura 8 – Estrutura da etiqueta proposta.



Os valores de cada um dos parâmetros que compõem a estrutura da etiqueta estão apresentados na Tabela III. Esses parâmetros finais foram determinados após uma gama de simulações realizadas sequencialmente, com parametrização das variáveis, de forma a sintonizar a etiqueta na frequência de operação desejada.

Tabela III – Valores dos parâmetros da estrutura proposta.

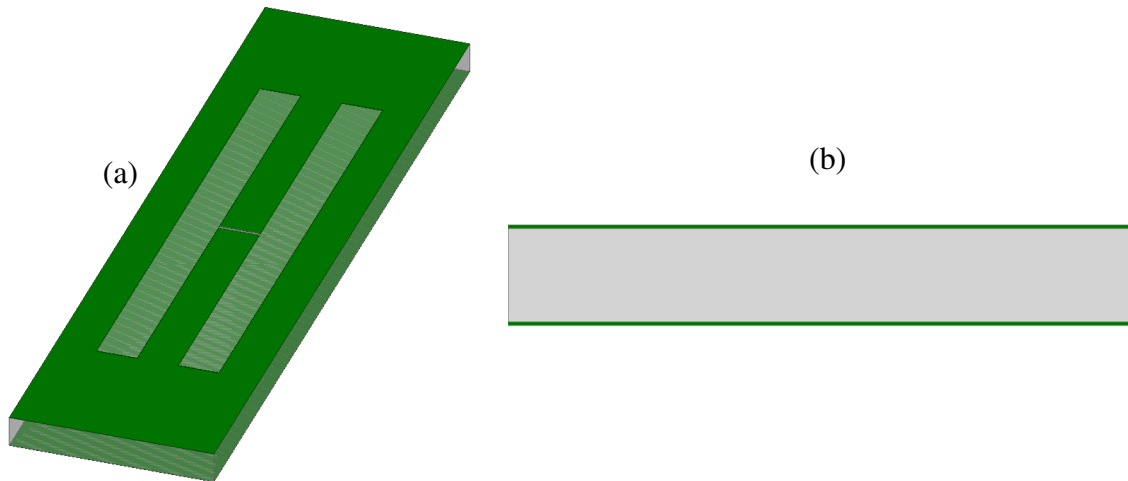
Parâmetro	Valor
a	75mm
b	20mm
c	4mm
d	48mm

A mesma estrutura foi utilizada para produzir uma etiqueta em substrato de FR4 ( $\epsilon_r = 4,4$ ;  $\text{tg}\sigma = 0,019$  e  $h = 1,52\text{mm}$ ), conseguindo-se o casamento de impedâncias a 915 MHz para  $a = 110\text{mm}$  e  $d = 90\text{mm}$ . Dessa forma, a utilização da borracha de EPDM no lugar do FR4 promoveu, de fato, uma redução na área total da etiqueta.



O modelo 3D da etiqueta é apresentado na Figura 9a e a vista lateral da mesma na Figura 9b.

Figura 9 – Modelo 3D (a) e vista lateral (b) da etiqueta.

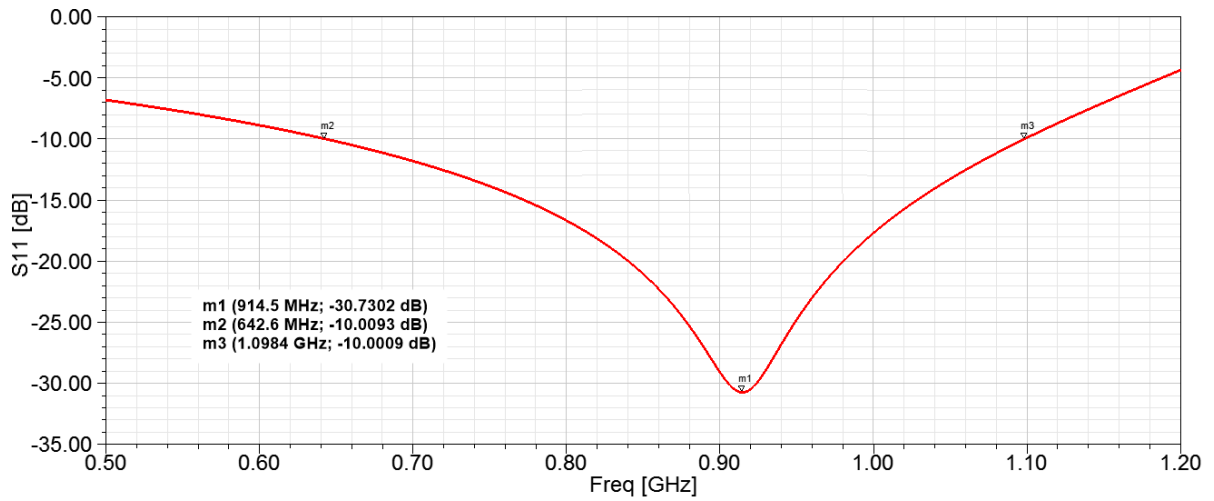


Para realizar a simulação foram modeladas as seguintes camadas e seus respectivos parâmetros:

- Geometria da etiqueta: material condutor (cobre adesivo) com espessura de 0,030mm;
- Substrato: material dielétrico (EPDM) com  $\epsilon_r = 1,30$ ;  $\text{tg}\sigma = 0,0064$  e espessura 3mm;
- Plano refletor: material condutor (cobre adesivo) com espessura de 0,030mm.

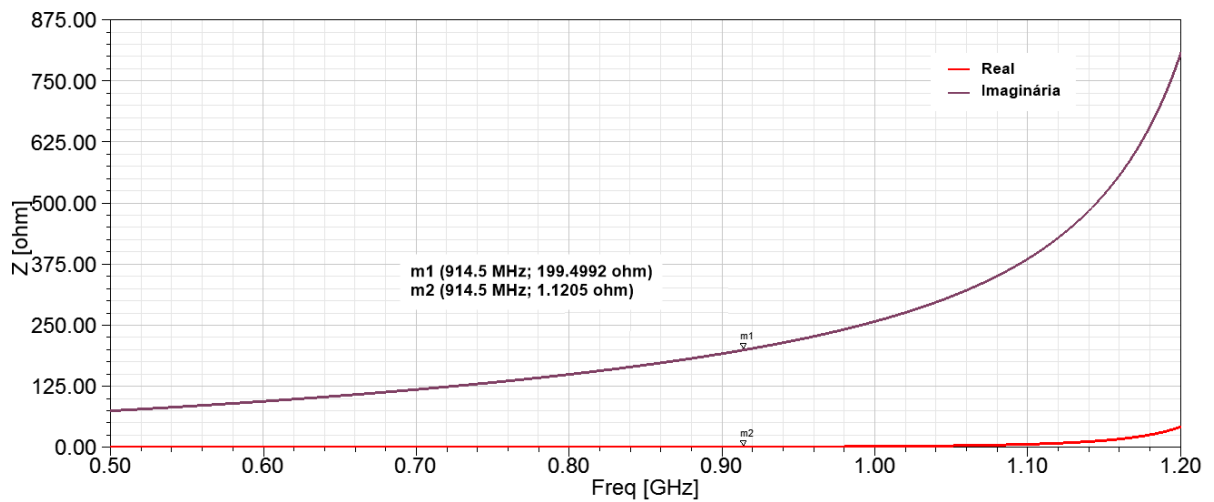
O chip escolhido para a confecção da etiqueta foi o SL3S4011/4021 da NXP©. Para a frequência UHF de 915 MHz, este chip apresenta uma impedância característica  $Z_{\text{chip}} = 12,7 - j199 \Omega$ . Dessa forma, para representar o chip na simulação, é colocada uma porta de mesma impedância no local onde este será soldado.

A Figura 10 a seguir mostra o resultado obtido com a simulação do coeficiente de reflexão ( $S_{11}$ ) da etiqueta. A frequência de ressonância obtida foi 914,5 MHz com uma intensidade de -30,73 dB. Verificou-se ainda que dentro da faixa de frequências que vai de 642,5 MHz a 1,1 GHz, o parâmetro  $S_{11}$  está abaixo de -10 dB.

Figura 10 – Coeficiente de reflexão ( $S_{11}$ ) da etiqueta.

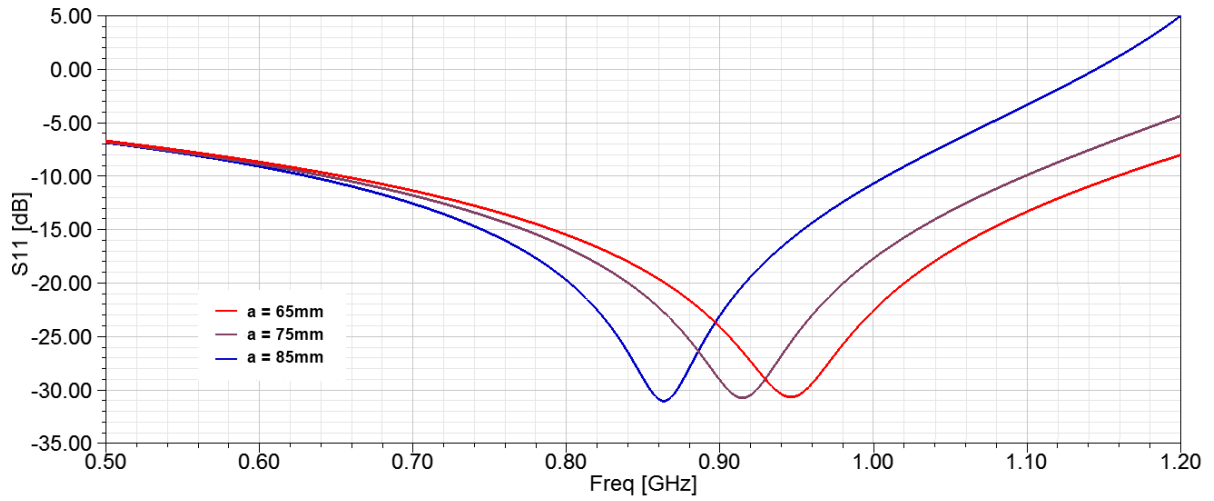
Na Figura 11 é apresentado o resultado obtido para a impedância de entrada da etiqueta,  $Z_{in}$ . O ideal é que esta impedância seja o mais próximo possível do conjugado da impedância do chip que será utilizado ( $Z_{in} = Z_{chip}^* = 12,7 + j199 \Omega$ ). Pode-se perceber que apesar da parte real ter ficado distante do valor esperado, a parte imaginária está bem casada, o que garante a sintonização da antena para a frequência de operação de interesse.

Figura 11 – Impedância de entrada da etiqueta.



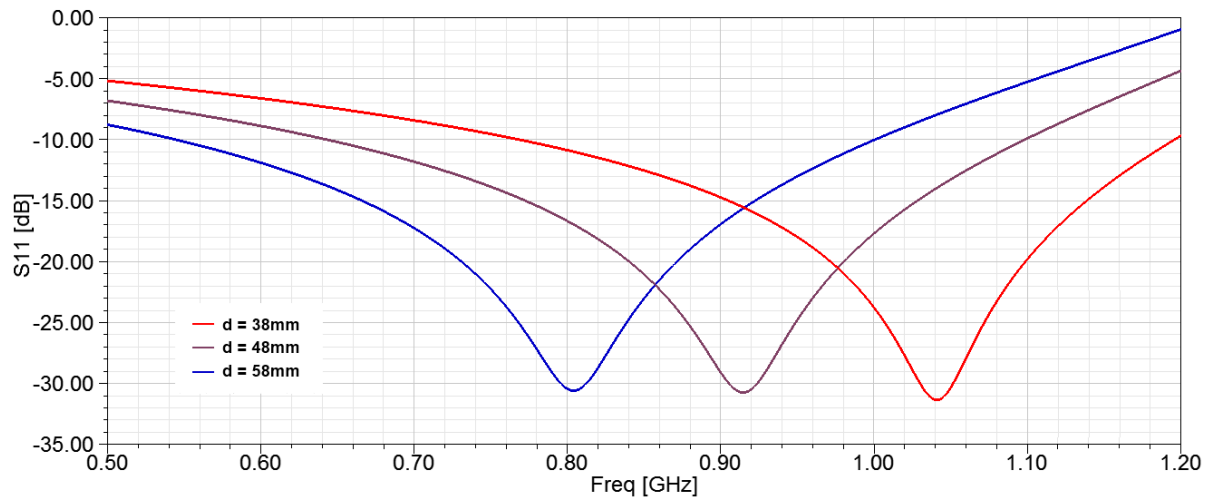
A resposta da etiqueta, em termos de frequência de ressonância, é sensível a modificação dos parâmetros que compõem sua geometria. Com o HFSS é possível criar variáveis para esses parâmetros e analisar sua influência nos resultados obtidos. A Figura 12 mostra a variação no coeficiente de reflexão  $S_{11}$  da etiqueta em função do parâmetro a.

Figura 12 – Variação do coeficiente de reflexão ( $S_{11}$ ) da etiqueta em função do parâmetro a.



Já na Figura 13 podemos ver a variação no coeficiente de reflexão  $S_{11}$  da etiqueta também em função do parâmetro d.

Figura 13 – Variação do coeficiente de reflexão ( $S_{11}$ ) da etiqueta em função do parâmetro d.

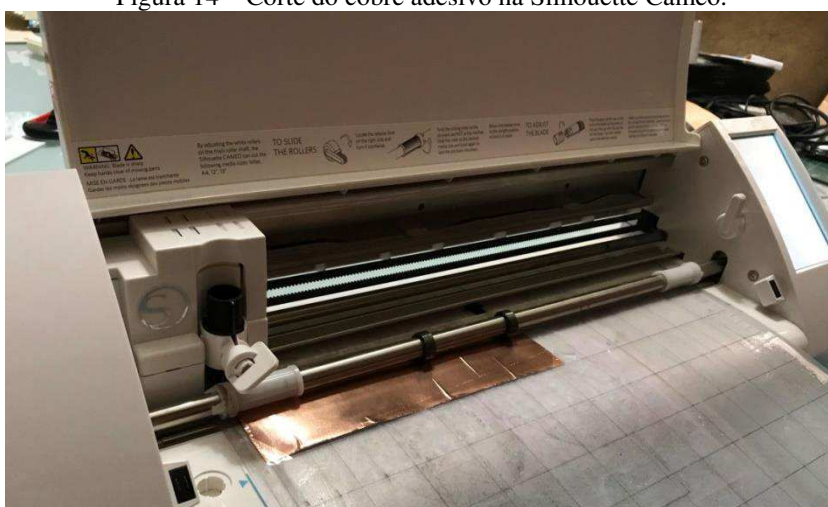


Isso permite que através de parametrizações seja possível encontrar um ponto de bom casamento de impedância dessa etiqueta com vários chips presentes no mercado. Além disso, torna possível sua utilização em diferentes faixas de frequência, como pode-se perceber na Figura 11: para  $a = 75\text{mm}$ , a etiqueta está sintonizada para a frequência UHF de 915 MHz (EUA e Brasil) e para  $a = 85\text{mm}$  conseguimos sintonizá-la para a frequência UHF europeia de 870 MHz.

## 4. FABRICAÇÃO DA ETIQUETA

Após o processo de simulação e sintonização para a frequência de 915 MHz, a etiqueta foi fabricada. Fazendo-se uso de uma Silhouette Cameo – máquina bastante utilizada na área de artesanato para corte de papéis, tecidos e outros materiais – importou-se o arquivo com a geometria obtida e realizou-se o corte da fita cobre adesivo no mesmo formato, como mostra a Figura 14.

Figura 14 – Corte do cobre adesivo na Silhouette Cameo.

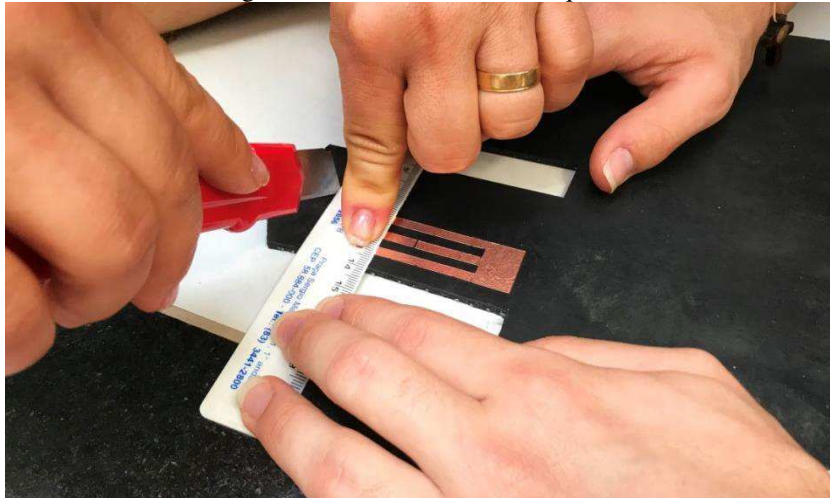


Em seguida, o adesivo foi aplicado sobre a manta de borracha e fez-se o corte da etiqueta manualmente com o uso de um estilete comum, como ilustrado nas Figuras 15 e 16.

Figura 15 – Aplicação do cobre adesivo sobre a manta de borracha.



Figura 16 – Corte manual da etiqueta.



Após a confecção, o chip foi soldado no local especificado e nas Figuras 17 e 18 é apresentado o protótipo final da etiqueta, destacando suas dimensões.

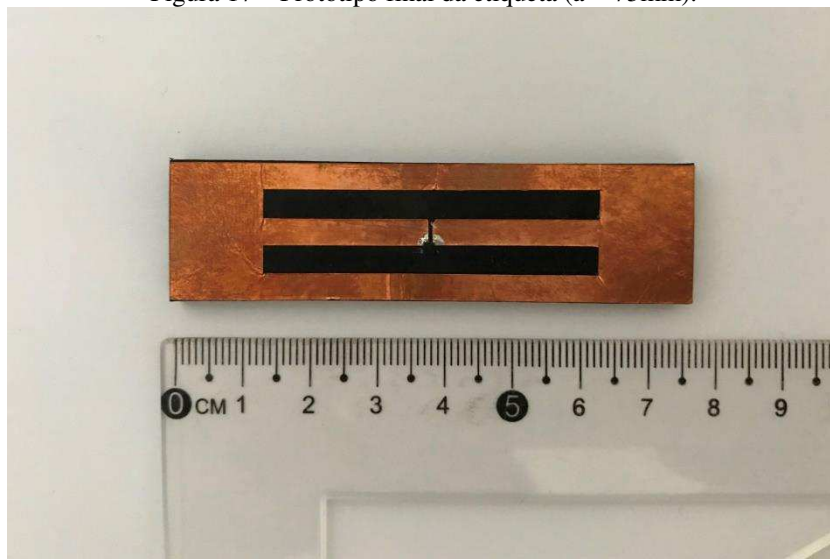
Figura 17 – Protótipo final da etiqueta ( $a = 75\text{mm}$ ).

Figura 18 – Protótipo final da etiqueta ( $b = 20\text{mm}$ ).



Na Figura 19 é mostrado o outro lado da etiqueta onde foi colocado o plano refletor.

Figura 19 – Protótipo final da etiqueta (plano refletor).





## 5. TESTES E RESULTADOS

Finalizado o processo de fabricação, foram realizados os testes de validação do uso dessa etiqueta para a faixa UHF americana (902 – 928 MHz). Para isso, utilizou-se no leitor uma antena de polarização circular com ganho 9dBic na faixa de frequência desejada.

O setup de medição consistiu em utilizar um suporte de isopor para apoiar a etiqueta colocada em um plano paralelo ao da antena do leitor. Variou-se entre os testes a posição da etiqueta (horizontal e vertical) – como mostrado nas Figuras 20 e 21, respectivamente –, bem como a distância (DIST) entre ela e a antena.

Figura 20 – Setup de medição com a etiqueta na posição horizontal.

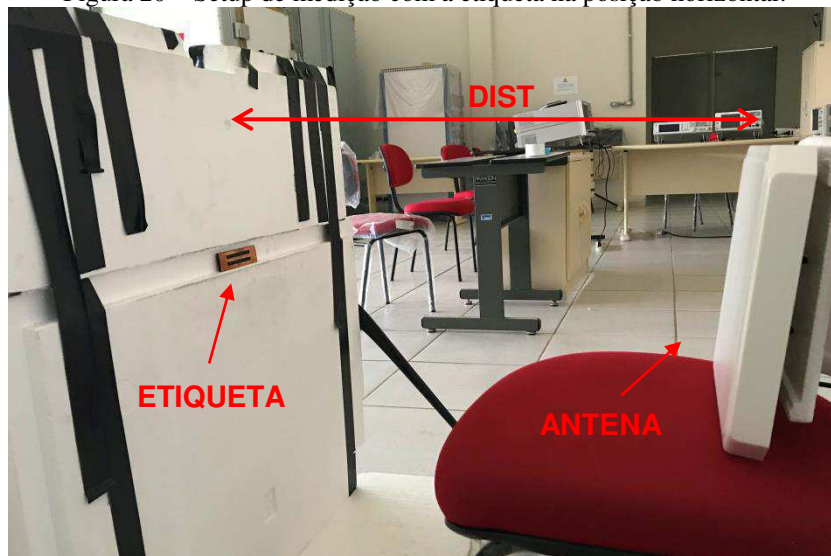
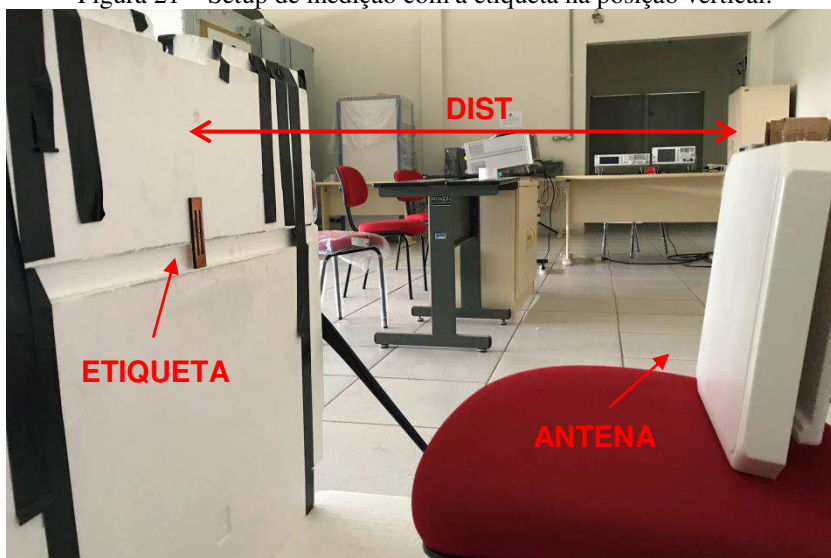


Figura 21 – Setup de medição com a etiqueta na posição vertical.



Para cada situação foram feitos dois testes, a título de aumentar a confiabilidade dos resultados. O teste consiste em realizar as operações de leitura e escrita na etiqueta, bem como em verificar o RSSI médio de cada uma dessas operações.

- Para uma distância DIST = 55cm

A Tabela IV apresenta os resultados obtidos para esta situação. Pode-se perceber que para este caso todas as operações, tanto de leitura quanto de escrita, foram realizadas com sucesso para as duas posições em que a etiqueta foi colocada. O RSSI médio tanto para leitura quanto para escrita é melhor com a etiqueta posicionada horizontalmente.

Tabela IV – Resultados da medição a uma distância DIST = 55cm.

	POSIÇÃO	LEITURA		ESCRITA
		RSSI médio	Desvio Padrão	RSSI médio
<b>TESTE 1</b>	Horizontal	-56,0 dBm	0,372122292	-55,4 dBm
	Vertical	-58,3 dBm	0,878122998	-57,4 dBm
<b>TESTE 2</b>	Horizontal	-56,1 dBm	0,323844098	-55,4 dBm
	Vertical	-58,2 dBm	1,10770032	-57,2 dBm

- Para uma distância DIST = 65cm

A Tabela V apresenta os resultados obtidos para esta situação. Já neste caso é possível observar a degradação no RSSI médio para a operação de leitura em todos os testes, se comparados ao caso anterior. Além disso, na posição vertical não foi possível realizar a operação de escrita na etiqueta.

Tabela V – Resultados da medição a uma distância DIST = 65cm.

	POSIÇÃO	LEITURA		ESCRITA
		RSSI médio	Desvio Padrão	RSSI médio
<b>TESTE 1</b>	Horizontal	-58,0 dBm	1,585646556	-56,8 dBm
	Vertical	-63,4 dBm	0,759943941	–
<b>TESTE 2</b>	Horizontal	-58,5 dBm	1,773774225	-56,8 dBm
	Vertical	-63,3 dBm	0,625911101	–



- Para uma distância DIST = 75cm

A Tabela VI apresenta os resultados obtidos para esta situação. Mais uma vez, com o aumento da distância, há uma degradação no valor do RSSI médio. Neste caso, não foi possível realizar nenhuma das operações com a etiqueta na vertical, nem a operação de escrita com a etiqueta na horizontal.

Tabela VI – Resultados da medição a uma distância DIST = 75cm.

	POSIÇÃO	LEITURA		ESCRITA
		RSSI médio	Desvio Padrão	RSSI médio
<b>TESTE 1</b>	Horizontal	-59,0 dBm	0,913605252	–
	Vertical	–	–	–
<b>TESTE 2</b>	Horizontal	-59,7 dBm	0,383775912	–
	Vertical	–	–	–

- Para uma distância DIST = 100 cm

A distância de 100 cm foi definida como a distância de corte, em que a etiqueta parou de funcionar para qualquer uma das posições, e nenhum dos procedimentos (leitura e escrita) foi realizado. Esta distância define então o alcance efetivo do sistema.

## 6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este estágio proporcionou um maior conhecimento na área de projeto de etiquetas RFID em materiais flexíveis, abordando desde a escolha do material e sua caracterização, até a confecção da etiqueta e os testes para validação de sua aplicabilidade.

As simulações realizadas permitiram conhecer melhor as diversas ferramentas oferecidas pelo *Electronics Desktop* da ANSYS®, incluindo os processos de parametrização que contribuem para o encontro do ponto de melhor casamento de impedâncias entre a antena e o chip escolhido.

Os resultados obtidos com os testes mostram que o aumento da distância entre a etiqueta e a antena do leitor degrada significativamente o desempenho desta. Contudo, se mantivermos esta distância abaixo do limite máximo de alcance definido de 1 metro, é possível operar com esta etiqueta dentro da faixa de frequências UHF de 902 – 928 MHz.

Como trabalho futuro, é importante investigar técnicas de aprimoramento do desempenho da etiqueta, possibilitando um aumento do alcance de leitura, bem como analisar sua aplicabilidade, por exemplo, em roupas para monitoramento de sinais biomédicos.

Além disso, verificou-se que mesmo o substrato escolhido sendo flexível, o cobre adesivo utilizado como material condutor limita a flexibilidade da etiqueta final por ser bastante sensível a forças de tração. Outra sugestão de trabalho seria verificar a possibilidade de substituição do adesivo pela tinta condutora.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] KHALEEL, H. R. Innovation in wearable and flexible antennas. Southampton, United Kingdom: WIT Press, 2015.
- [2] HUNT, V. D.; PUGLIA, A.; PUGLIA, M. RFID – A guide to Radio Frequency Identification. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2007.
- [3] EPC-RFID INFO. **What is RFID?** Chicago, IL. Disponível em: <<https://www.epc-rfid.info/rfid>> Acesso: 13 fev. 2018.
- [5] Y. Hu, X. Guo and J. Zhu, "Research on RFID-based monitoring platform for wireless sensor networks," *Proceedings of 2011 International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology*, Harbin, Heilongjiang, China, 2011, pp. 1909-1912.
- [6] S. Preradovic and N. C. Karmakar, "Chipless RFID: Bar Code of the Future," in *IEEE Microwave Magazine*, vol. 11, no. 7, pp. 87-97, Dec. 2010.
- [7] A. I. Petrariu, V. Popa and A. Chirap, "Metal mountable microstrip patch UHF RFID tag antenna," *2015 International Symposium on Signals, Circuits and Systems (ISSCS)*, Iasi, 2015, pp. 1-4.
- [8] S. Manzari, S. Pettinari and G. Marrocco, "Miniaturized and tunable wearable RFID tag for body-centric applications," *2012 IEEE International Conference on RFID-Technologies and Applications (RFID-TA)*, Nice, 2012, pp. 239-243.
- [9] MOUSER ELECTRONICS. **3M 1181 Tape – Copper Foil with Conductive Adhesive (Data Sheet)**. Disponível em: <<https://www.mouser.com/ds/2/1/1181-45855.pdf>> Acesso: 13 fev. 2018.
- [10] HABASIT. **Etileno-propileno terpolimero**. Disponível em: <<http://www.habasit.com/br/epdm.htm>> Acesso: 13 fev. 2018.
- [11] RUBBERPEDIA. **Borracha Etileno-Propileno-Dieno (EPDM)**. Disponível em: <<http://www.rubberpedia.com/borrachas/borracha-epdm.php>> Acesso: 13 fev. 2018.
- [12] ANSYS. **Electronics Desktop**. Disponível em: <<https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-electronics-desktop>> Acesso em: 22 fev. 2018.
- [13] ANSYS. **ANSYS Releases Ansoft Designer 6.0 with Solver on Demand Technology Integrating HFSS and HSPICE**. Disponível em: <<https://www.ansys.com/About-ANSYS/News-Center/07-29-10-ANSYS-Releases-Ansoft-Designer-6-0>> Acesso em: 22 fev. 2018.
- [14] MAXWELL. **Análise de estruturas via ANSYS**. PUC-Rio. Rio de Janeiro, RJ. Disponível em: <[https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/5111/5111\\_3.PDF](https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/5111/5111_3.PDF)> Acesso em: 22 fev. 2018.

- [15] T. Phatarachaisakul, T. Pumpoung, C. Phongcharoenpanich and S. Kosulvit, "Tag antenna using printed dipole with H-slot for UHF RFID applications," *2014 International Electrical Engineering Congress (iEECON)*, Chonburi, 2014, pp. 1-4.