

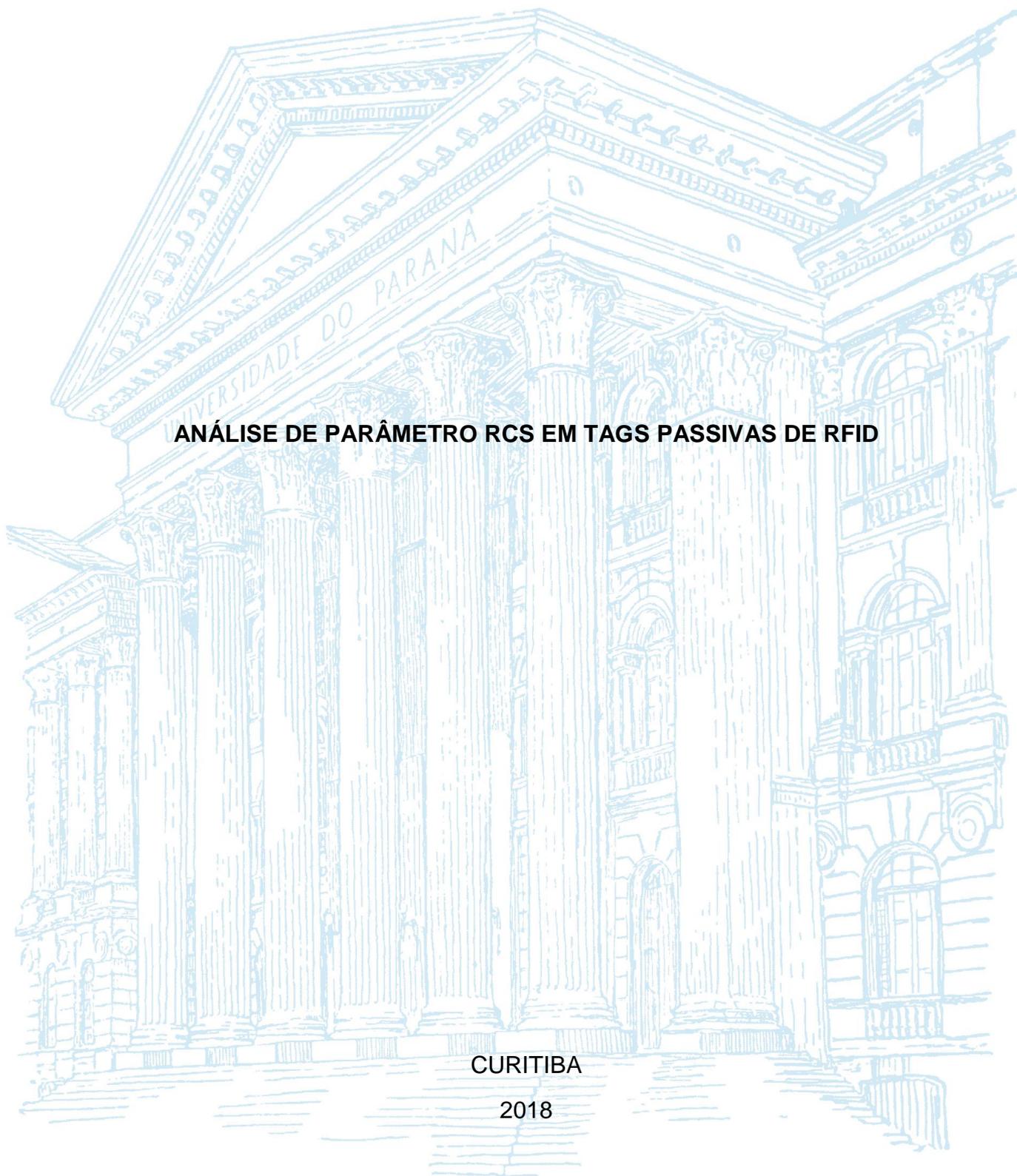
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ALESSANDRA HARUMI ANAMI

**ANÁLISE DE PARÂMETRO RCS EM TAGS PASSIVAS DE RFID**

CURITIBA

2018



ALESSANDRA HARUMI ANAMI

**ANÁLISE DE PARÂMETRO RCS EM TAGS PASSIVA DE RFID**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Wilson Artuzi Jr.

CURITIBA

2018

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

ALESSANDRA HARUMI ANAMI

### **ANÁLISE DE PARÂMETRO RCS EM TAGS PASSIVA DE RFID**

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel, Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

---

Prof. Dr. Wilson Artuzi Jr. (Orientador)  
Departamento de Engenharia Elétrica  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

---

MSc. Carlos Alexandre Gouvêa da Silva  
Departamento de Engenharia Elétrica  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

---

MSc. Rodrigo Godinho Silva  
Departamento de Engenharia Elétrica  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

Curitiba, 4 de dezembro de 2018.

Aos meus pais, por terem me ensinado  
a sonhar e me apoiado para concretizá-los.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, que esteve presente em cada etapa da minha vida, me mostrando o caminho e a direção a seguir. E por me ensinar que sempre temos a opção de realizar todas as atividades do dia a dia com amor e bem feito.

Também agradeço aos meus pais Gilberto e Denise Anami que me ofereceram apoio e incentivo para conclusão deste curso. Aos meus irmãos, André e Débora Anami, que sempre estiveram presentes mesmo na distância.

Agradeço ao meu namorado, Adriano Peniche dos Santos, quem sempre me motivou, acreditou no meu potencial e esteve comigo durante todos os momentos.

Ao meu orientador, professor dr. Wilson Artuzi, que cedeu parte do seu tempo para me orientar neste trabalho e sempre esteve pronto para sanar as dúvidas.

Agradeço aos meus amigos, que tornaram o tempo da graduação mais divertido. Também agradeço pelos amigos que se tornaram uma segunda família na época do intercâmbio e aqueles que de longa data que acompanharam meu crescimento desde criança e estão comigo até hoje.

“Você não é o produto das circunstâncias,  
você é o produto das suas decisões”

(Viktor Frankl)

## RESUMO

Sistemas de RFID permitem a identificação de dispositivos que se comunicam por meio de ondas de rádio. Para que esses sistemas funcionem são necessários pelo menos uma tag, antena e um leitor. A tag é o objeto a ser identificado pela antena que por sua vez envia o sinal captado para um leitor capaz de interpretar esses dados. No caso deste trabalho, o objetivo do estudo é analisar as tags do tipo passiva e sem chip que são as etiquetas mais baratas encontradas atualmente. Para a análise de seu desempenho, foi desenvolvido um algoritmo capaz de analisar o parâmetro de seção de reta radar e aplicá-lo em tags de retrodispersão com assinatura eletromagnética modulados na frequência. Os resultados obtidos com o algoritmo trouxeram a possibilidade de análise de diagrama de RCS para ângulos de incidência e reflexão diferentes. Porém na aplicação de uma tag existente as frequências de ressonância da assinatura variaram para ângulos de polarização diferentes, não sendo possível identificar sua assinatura característica.

## **ABSTRACT**

RFID systems allows the identification of devices which communicate through radio electromagnetic waves. For those systems to work it is necessary tags, antennas and readers. The tag is the object who will be identified by the antenna and the antenna will send the signal to a reader capable of data analyses. The target of this research is to analyze passive and chipless tag, which are the cheapest type of tag. In order to analyze the tag's performance, it was developed an algorithm which calculates the radar cross section parameter and apply it to those backscatter tags with electromagnetic signature in the frequency domain reflectometry. The results are the possibility to analyze the diagram RCS for different incidence and reflection angles. However, when applying the algorithm in the tag it was noticed that the resonance frequency varies with the change of the polarization angle. And in this case, it was not possible to identify the characteristic singular signature.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – À ESQUERDA TAG RFID ATIVA NO MODELO POWER 60/65 E À DIREITA TAG PASSIVA MODELO FIT 210 .....	14
FIGURA 2 - SEGMENTAÇÃO DO MERCADO DE RFID MUNDIAL .....	15
FIGURA 3 - TIPOS DE TAGS PASSIVAS E SEM CHIP .....	18
FIGURA 4 – COMPARAÇÃO DO SISTEMA DE RFID COM CHIP E SEM CHIP .....	19
FIGURA 5 – RCS DE UMA PLACA LISA METÁLICA E ESFÉRICA .....	20
FIGURA 6 - PROPRIEDADES DA FONTE .....	22
FIGURA 7 – ONDA POLARIZADA .....	23
FIGURA 8 – ESQUEMA DO DESENHO E ÂNGULOS DE INCIDÊNCIA E REFLEXÃO.....	23
FIGURA 9 – PLACA LISA CONDUTORA COM ESPESSURA DE 0,5MM .....	24
FIGURA 10 – À ESQUERDA DESENHO GEOMÉTRICO NO GiD E À DIREITA APÓS A DISCRETIZAÇÃO .....	24
FIGURA 11 – CORRENTE GERADA POR CARGAS.....	25
FIGURA 12 - DIAGRAMA DE RADIAÇÃO TRIDIMENSIONAL.....	27
FIGURA 13 – DIAGRAMA DE RCS PARA CORTE XY PARA ÂNGULOS DE REFLEXÃO DIFERENTES .....	27
FIGURA 14 DIAGRAMA DE RCS PARA CORTE XZ PARA ÂNGULOS DE REFLEXÃO DIFERENTES .....	28
FIGURA 15 – TAG A SER SIMULADA .....	29
FIGURA 16 – A TAG DESENHADA NO GiD PARA SIMULAÇÃO .....	30
FIGURA 17 – TAG COM ESPESSURA DE 0,035 MM .....	31
FIGURA 18 - DISCRETIZAÇÃO DA TAG.....	32
FIGURA 19 – ESQUEMA DE MEDIÇÃO NA CÂMARA ANECOICA .....	32
FIGURA 20 – TAG CONFECCIONADA.....	33
FIGURA 21 – COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS DE CÁLCULO RCS COM MALHA DE 2 MM. 34	
FIGURA 22 – COMPARAÇÃO DE MÉTODOS CALCULADOS DE RCS COM MALHA DE 0,7MM .....	35
FIGURA 23 – PARAMETRO DE ESPALHAMENTO $S_{21}$ DA PLACA LISA NA CÂMARA ANECOICA.....	36
FIGURA 24 – SIMULAÇÃO DA TAG COM ÂNGULO DE INCIDÊNCIA DA FONTE DE ZERO GRAUS .....	36
FIGURA 25 – SIMULAÇÃO DA TAG EM SUA FAIXA DE FREQUÊNCIA DE OPERAÇÃO COM ÂNGULO ZERO DE INCIDÊNCIA.....	37
FIGURA 26 – DIAGRAMA DE RCS TRIDIMENSIONAL, COM CORTE XY E XZ.....	37
FIGURA 27 – SIMULAÇÃO DA TAG COM ÂNGULO DE INCIDÊNCIA DA FONTE DE 25,22°. 39	
FIGURA 28 - SIMULAÇÃO DA TAG EM SUA FAIXA DE FREQUÊNCIA DE OPERAÇÃO COM ÂNGULO 25,22° DE INCIDÊNCIA .....	39
FIGURA 29 – DIAGRAMAS DE RCS PARA ÂNGULO DE INCIDÊNCIA VERTICAL DE 25,22° .....	40
FIGURA 30 – COMPARAÇÃO DA FREQUÊNCIA DE RESSONÂNCIA PARA ÂNGULO 0°.....	41
FIGURA 31 - COMPARAÇÃO DA FREQUÊNCIA DE RESSONÂNCIA PARA ÂNGULO 25,22° 41	
FIGURA 32 – PARÂMETRO DE ESPALHAMENTO $S_{21}$ DA TAG NA CÂMARA ANECOICA ...	41
FIGURA 33 – RCS CALCULADO A PARTIR DAS MEDIÇÕES .....	42

## LISTA DE TABELA

TABELA 1 – LISTA DE SÍMBOLO DAS EQUAÇÕES MENCIONADAS.....	26
TABELA 2 – FREQUÊNCIAS DE RESSONÂNCIA PARA CADA CÓDIGO .....	30
TABELA 3 – TAMANHO DE CADA RESSONADOR POR EXEMPLO DE CÓDIGO .....	30

## LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

RFID	- <i>Radio Frequency Identification</i> (Identificação de Rádio Frequência)
RCS	- <i>Radar Cross Section</i> (Seção de Reta Radar)
MoM	- <i>Moment Methods</i> (Método dos Momentos)
TDR	- <i>Time Domain Reflectometry</i> (Reflectometria no Domínio do Tempo)
FDR	- <i>Frequency Domain Reflectometry</i> (Reflectometria no Domínio da frequência)
EMS	- <i>Electromagnetic Signature</i> (Assinatura Eletromagnética)
dBSm	- <i>Decibel Square Meter</i> (Decibel metro quadrado)
NFC	- <i>Near Field Communication</i> (Comunicação por campo de proximidade)
GiD	- <i>Geometry and Data</i> (Geometria e dados)

## SUMÁRIO

<b>SUMÁRIO .....</b>	<b>12</b>
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>13</b>
1.1 JUSTIFICATIVA.....	15
1.2 OBJETIVOS.....	16
1.2.1 <i>Objetivo geral</i> .....	16
1.2.2 <i>Objetivo específicos</i> .....	16
1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO.....	16
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>18</b>
2.1. TAGS PASSIVAS E SEM CHIP DE RFID.....	18
2.2. SEÇÃO DE RETA RADAR (RCS).....	20
2.3. MÉTODO DOS MOMENTOS (MoM) .....	21
<b>3. METODOLOGIA .....</b>	<b>22</b>
3.1. PRÉ-PROCESSAMENTO GEOMÉTRICO.....	22
3.2. CÁLCULO NUMÉRICO DOS DADOS.....	25
3.3. DIAGRAMA DE RCS.....	26
3.4. AVALIAÇÃO DO ALGORITMO.....	28
3.5. TAG.....	28
<b>4. RESULTADOS .....</b>	<b>34</b>
4.1. AVALIAÇÃO DO ALGORITMO.....	34
4.2. SIMULAÇÃO E MEDIÇÃO DA TAG.....	36
<b>5. ANÁLISE E CONCLUSÃO .....</b>	<b>43</b>
5.1. ANÁLISE DOS DADOS .....	43
5.2. CONCLUSÃO.....	44
5.3. TRABALHOS FUTUROS.....	45
<b>REFERÊNCIA.....</b>	<b>46</b>
<b>ANEXO 1 – CÓDIGO DO PROGRAMA ‘RCS’ PARA MATLAB.....</b>	<b>48</b>
<b>ANEXO 2 – EXTRAÇÃO DADOS DO GID.....</b>	<b>54</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A palavra RFID significa “Radio frequency identification”, traduzido como identificação por rádio frequência, é um dispositivo capaz de se comunicar por meio de ondas de rádio. O conceito do RFID existe desde século passado. Na segunda guerra mundial já se utilizava sistemas de radares, onde a dificuldade era diferenciar o avião identificado pelo radar como inimigo ou não. Dessa forma, os alemães descobriram que se o piloto do avião executasse um “loop” no ar a forma de onda captada pelo radar se alterava, dessa forma surgiu o primeiro conceito de identificação de rádio frequência. Em resposta a isso, os britânicos adicionaram em seus aviões um dispositivo que emitia sinal de resposta após reconhecer o sinal da própria base britânica. Isso foi possível, através da utilização do mesmo conceito de sistema de RFID ativo. (RFID Journal, 2005).

Após esse período, os estudiosos passaram a dedicar seus estudos nestes dispositivos e a adicionar novas implementações para esse mesmo conceito de identificar objetos a partir de ondas de rádio. Surgiram então aplicações nas mais variadas áreas como a farmacêutica, manufatura em geral, veículos de transporte, bens de consumo entre outros. Também chegou até a impulsionar o conceito de Internet das Coisas e Indústria 4.0.

Os sistemas de RFID são compostos por tag, antena e um leitor. A tag é o objeto a ser identificado por meio de ondas de radiofrequência pela antena, que por sua vez envia esse sinal captado para um leitor que é capaz de ler e interpretar os sinais. No caso deste trabalho a análise será apresentada em função das tags.

Existem diversos tipos de classificações de *tags*. Serão abordados a classificação quanto a fonte de energia e quanto ao armazenamento de dados. A primeira, é em relação a alimentação de energia necessária para *tag*, podem ser classificados em:

- Ativa: São alimentadas por uma fonte de bateria para que essa consiga amplificar e transmitir o sinal. Também possuem moduladores de radiofrequência. Nesse caso, a etiqueta emite sinal constantemente e independente da presença de um leitor.
- Passiva: São alimentadas pela energia das ondas eletromagnéticas emitidas pela antena do leitor. Ou seja, absorvem parte dessa energia e refletem o sinal para o meio.
- Semi-passiva ou semi-ativa: São as etiquetas que possuem bateria interna para a sua alimentação como a ativa, mas que necessitam estar próxima de uma antena para a troca de informações como a passiva.

Uma das grandes desvantagens das etiquetas ativas é o limite de vida delas. Pois na maioria dos casos não é possível realizar a troca de bateria e acaba

sendo necessário a compra de uma nova. Mas por outro lado, elas possuem maior alcance em comparação com outras *tags* e são mais caras, limitando algumas aplicações. As passivas são as mais baratas, porém geram um aumento da complexidade nos leitores, e geralmente as aplicações são limitadas pelo alcance.

A segunda classificação (Karmakar, 2016) é quanto ao armazenamento de dados:

- Com Chip: Possuem maior capacidade de memória e de processamento de sinal, além de possibilitar que a informação contida na etiqueta possa ser apagada para escrever outro dado.
- Sem chip: Não possuem processamento de sinal, nem a possibilidade de reescrever a memória. Podem ser impressos em diferentes materiais como papéis e materiais plásticos, duros ou flexíveis e ainda são mais baratos.

Um dos fabricantes de etiquetas existentes é a Omni-ID. A figura 1, mostra um exemplo de *tag* passiva e outro modelo ativo junto com as suas especificações de tamanho. As características de RFID variam de projeto para projeto, dependendo da implementação. Pode-se fazer diversas combinações de sistemas de etiquetas, com diferentes tipos de antenas e leitores.

Figura 1 – A esquerda tag rfid ativa no modelo power 60/65 e a direita tag passiva modelo fit 210

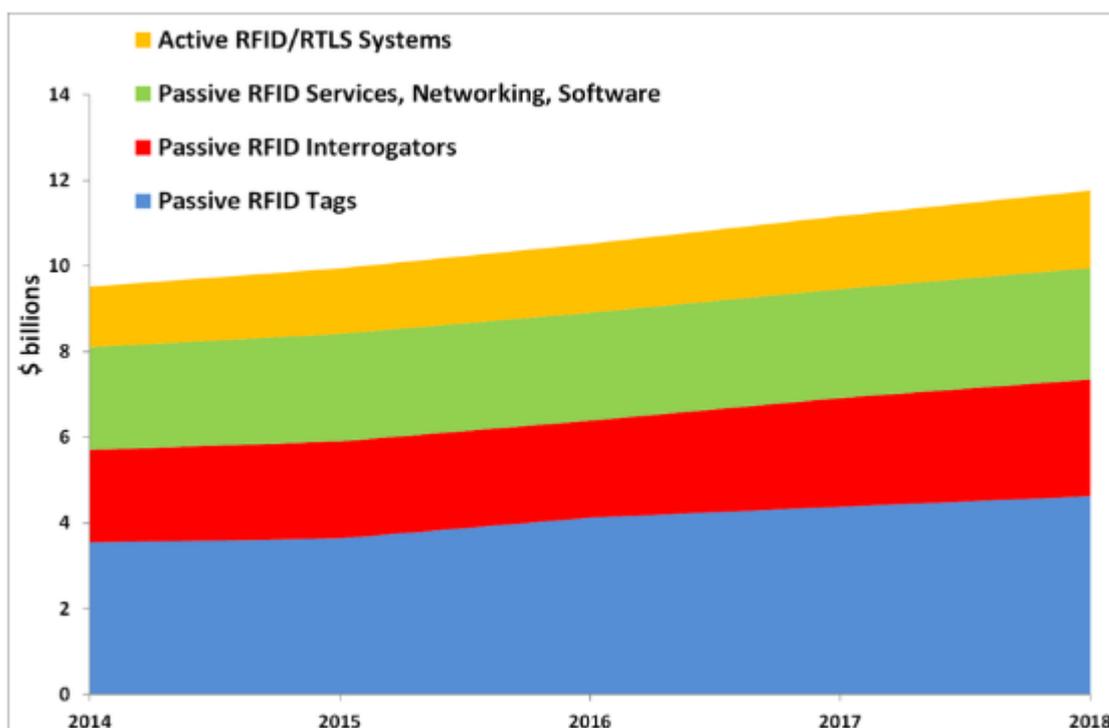


Fonte: Fabricante Omni-ID.

Segundo a pesquisa realizada pela IDTechEx em 2017, o mercado de RFID mundial foi de 9,95 bilhões de dólares em 2015 e 10,52 bilhões de dólares em 2016. A mesma, ainda estimativa para 2017 e 2022 11,2 bilhões de dólares e 14,9 bilhões de dólares, respectivamente. Esses dados são extraídos

considerando o mercado de *tags*, *readers*, *softwares* e serviços. (IDTechEx 2017). A pesquisa também mostra que abrindo os resultados por segmento dentro do mercado de RFID, as *tags* passivas mostram uma expectativa de crescimento e a previsão é de finalizar este ano de 2018 perto de 4 bilhões de dólares, como ilustrado na Figura 2.

Figura 2 - Segmentação do mercado de RFID mundial



Fonte: IDTechEx 2017

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Neste trabalho a abordagem pela análise de *tags* passivas e sem chip foi escolhida pelas vantagens:

- Essas etiquetas são mais baratas em relação as que possuem chip e bateria;
- Possuem processo produtivo mais simples, uma vez que não há a necessidade de soldagem de pequenos componentes;
- Possibilita aplicações onde o custo da etiqueta ainda é uma limitação.

No caso da etiqueta passiva e sem chip, estuda-se que a principal aplicação seja a substituição de códigos de barras em produtos por etiquetas de RFID que facilitem sua leitura e praticidade. Mas para isso, são necessárias mais pesquisas nessa área, para entender melhor seu funcionamento e possibilidades

de aplicações, além de estudos que possibilitem reduções de custos dessas etiquetas para viabilizar às aplicações.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho de conclusão de curso é analisar o desempenho por meio do parâmetro seção de reta radar (RCS – *Radar Cross Section*) de *tags* passivas e sem chip.

### 1.2.2 Objetivo específicos

Os objetivos específicos são:

a) Analisar algoritmo desenvolvido nesse trabalho para simulação de RCS:

- Desenvolver algoritmo que calcule o RCS.
- Estudar as alterações no resultado variando parâmetro relacionados ao método de cálculo do algoritmo.

b) Analisar o desempenho de *tags* passivas de RFID:

- Aplicar o algoritmo nas etiquetas propostas por V. Arnaud, P. Etienne, e T. Tedjini na faixa de frequência de 1 Ghz a 5 GHz.
- Ampliar a análise de desempenho de RCS nas *tags* para ângulos diferentes.
- Realizar medida em câmara anecóica para comparação com o resultado obtido do algoritmo.

## 1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

O primeiro capítulo do presente trabalho apresenta uma introdução ao tema de estudo, algumas classificações, situação de mercado, justificativa da escolha do tema e os objetivos.

No segunda capítulo são abordados temas do funcionamento de RFID passivos e sem chip, conceito de RCS e método dos momentos.

O terceiro capítulo apresenta a metodologia utilizada, descreve os princípios de funcionamento do algoritmo, é apresentado o método dos momentos e RCS aplicado no algoritmo, e também a descrição da *tag* a ser simulada e medida.

Quarto são mostrados os resultados das simulações e medições de uma placa lisa condutora e da *tag*.

Quinto e último capítulo as considerações finais, conclusões alcançadas e trabalhos futuros. E em anexo se encontram os códigos utilizados para este trabalho.

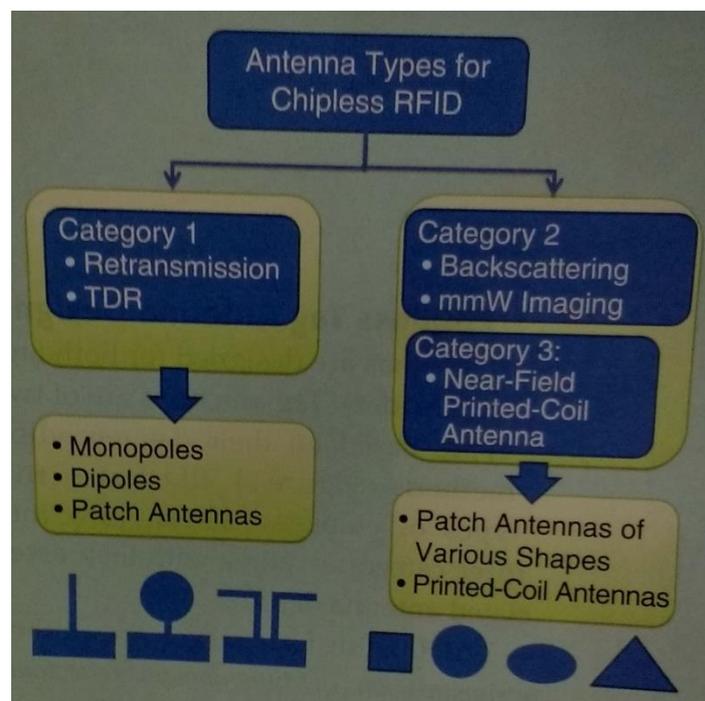
## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1. TAGS PASSIVAS E SEM CHIP DE RFID

Apesar da vantagem de etiquetas de RFID passivas e sem chips serem as mais baratas, sua utilização possui grandes desafios. Começando pela antena, a dificuldade se torna devido a potência do sinal transmitido, que dependendo da faixa de frequência utilizada possui uma potência irradiada máxima na ordem de mW. Por exemplo, para uma etiqueta que trabalha em uma faixa de frequência de 2,4 GHz a 2,46 GHz, reflete um sinal na ordem de 10 mW, enquanto uma etiqueta com chip é capaz de transmitir na ordem de 3 W à 4 W. Em consequência disso, a distância possível de leitura dessas etiquetas passivas é menor. (Karmakar, 2016).

Outra característica que difere a etiqueta passiva é em relação ao seu design, nela contém várias pequenas antenas dentro da própria etiqueta e quanto maior número de antenas o tamanho da etiqueta se torna maior. As antenas presentes na *tag*, são classificadas em três tipos diferentes dependendo da codificação de dados. A primeira categoria é de retransmissão ou reflectometria no domínio do tempo (TDR – *Time Domain Reflectometry*). A segunda categoria utiliza a retroespalhamento e ondas milimétricas ativas com imagem. Por fim, a terceira classificação utiliza bobinas impressas que se comunicam sem fio (NFC - *Near Field Communication*) (Fletcher, 2002). A figura 3 ilustra essa classificação.

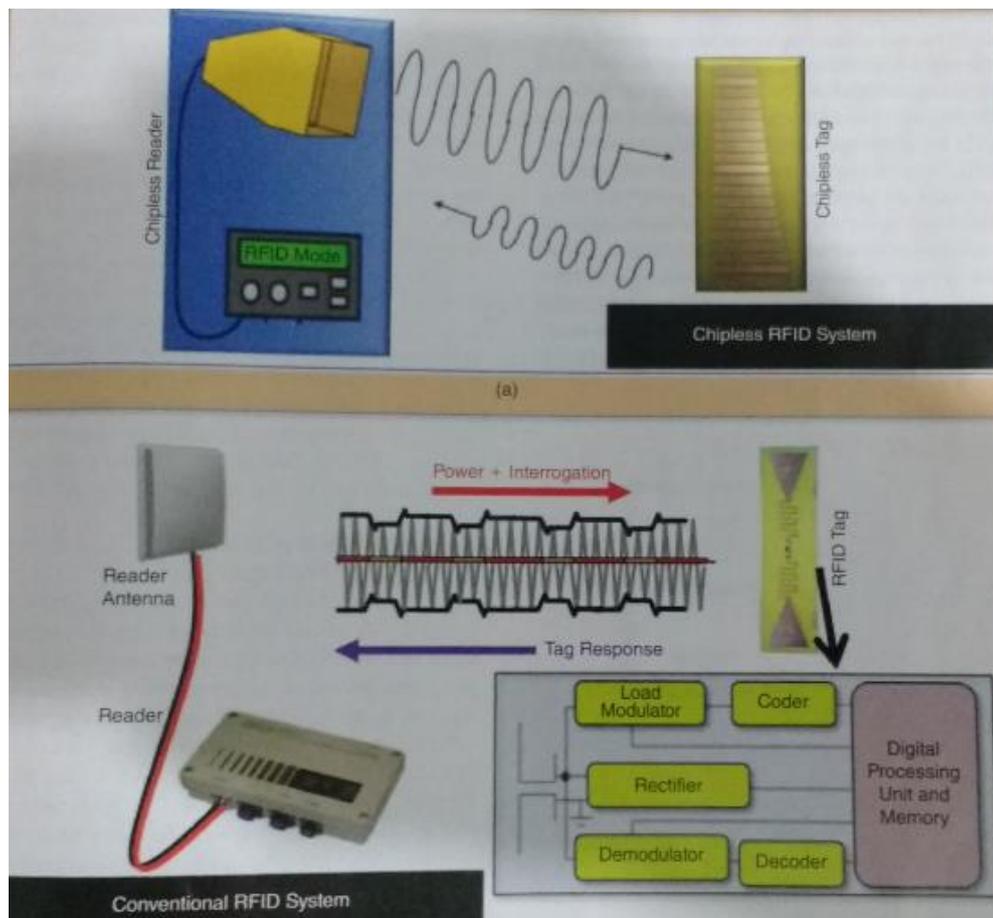
Figura 3 - Tipos de tags passivas e sem chip



Fonte: Microwave magazine IEEE 2013

A figura 4 ilustra o funcionamento do sistema de RFID ao utilizar tag passiva da segunda categoria. Onde a antena presente na tag funciona como um espalhador das ondas incidentes, ou seja, as ondas eletromagnéticas se retroespalham após incidir sobre a etiqueta versus o sistema de RFID que possui processamento de dados e chip dentro da tag. (Karmakar, 2013).

Figura 4 – Comparação do sistema de RFID com chip e sem chip



Fonte: Microwave magazine IEEE 2013

O princípio de funcionamento de uma tag do tipo retroespalhadora é decorrente da incidência de ondas eletromagnéticas na antena da etiqueta, gerando correntes na superfície condutora. Essas correntes, por sua vez também geram ondas eletromagnéticas que irradiam da tag para o ambiente. Essas ondas irradiadas são sinais refletidos retroespalhados da antena. Dessa forma, cada antena presente na tag possui uma resposta em frequência única conhecida como assinatura eletromagnética (EMS - *Eletromagnetic signature*). Por isso, é importante que o projetista da tag garanta que cada antena tenha sua assinatura única em frequência. (Karmakar, 2013).

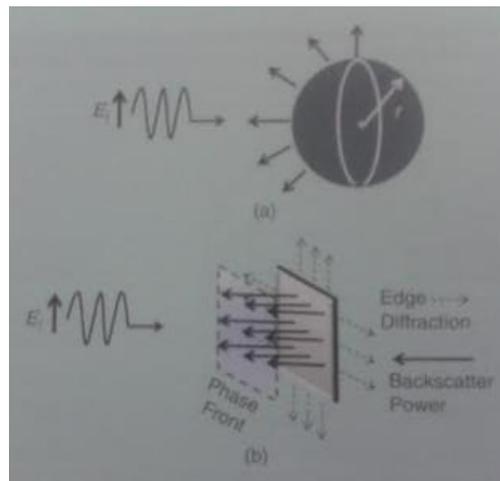
Para a identificação da assinatura desse tipo de *tag* é utilizado o parâmetro chamado de seção de reta radar (RCS - *Radar Cross Section*). Esse parâmetro pode ser calculado para qualquer antena e superfície condutora.

## 2.2. SEÇÃO DE RETA RADAR (RCS)

A seção de reta radar (RCS) por definição é uma medida que mostra a capacidade de um objeto em refletir sinal de rádio em direção ao receptor. Aplicando a definição para o caso de *tags* passivas e sem chip, o RCS é a capacidade da onda refletida pela *tag* em relação a onda refletida de uma área de 1m<sup>2</sup> da seção de uma esfera. A unidade do RCS é dada em m<sup>2</sup> ou em metro quadrado decibel (dBsm - *square meter decibel*).

O RCS de uma placa lisa metálica, como mostrado na figura 5, é calculado pela equação (1), onde A é a área da placa lisa condutora, e  $\lambda$  o comprimento de onda na frequência de utilização.

Figura 5 – RCS de uma placa lisa metálica e esférica



Fonte: Microwave magazine IEEE 2016

$$RCS_{plate} = 4\pi \frac{A^2}{\lambda^2} [m^2] \quad (1)$$

Entender o funcionamento desse parâmetro é importante para se obter um design eficiente da etiqueta. Nas *tags* de retroespalhamento ela possui as duas funções simultaneamente: a codificação do dado e a dispersão da onda eletromagnética. No caso, a própria dispersão da onda já transmite a codificação no domínio da frequência chamada de reflectometria no domínio da frequência (FDR - *Frequency Domain Reflectometry*). Essa codificação é possibilitada pelo design da etiqueta, que altera os parâmetros de RCS e possibilita a assinatura

eletromagnética ser associada a uma identificação. Por isso, para o desenvolvimento de *tags* passiva, o estudo do parâmetro RCS é essencial.

O RCS da *tag* pode ser calculada utilizando a equação (2). Onde  $\vec{E}_r$  é o campo elétrico refletido e  $\vec{E}_i$  é o incidente. (Harrington, 1968).

$$\text{RCS} = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|\vec{E}_r|^2}{|\vec{E}_i|^2} \quad (2)$$

### 2.3. MÉTODO DOS MOMENTOS (MoM)

Geralmente os problemas que envolvem o cálculo de campos eletromagnéticos acabam se deparando com a necessidade de resolver equações lineares diferenciais. Por isso, um método alternativo para esse tipo de problema é a utilização do método dos momentos (MoM). Este método é uma técnica de resolução de equações diferenciais por redução destas a um sistema de equações lineares simples. (Casimiro, A. Lopes, V. Emidio, F).

A ideia do método é dividir a superfície de um objeto em tamanhos geométricos triangulares pequenos, possibilitando a discretização dos dados. Para este trabalho cada vértice do triângulo é uma carga e cada segmento de reta é uma corrente. Assim, os resultados dessas equações lineares resultantes resolvem o problema.

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1. PRÉ-PROCESSAMENTO GEOMÉTRICO

O algoritmo deste trabalho, chamado de “rcs”, foi baseado no algoritmo de fonte aberta chamado “jsim” por Eduardo Jagher em 2014. Esse foi desenvolvido no *software* de geometria e dados (GiD - *Geometry and Data*), este *software* faz a interface gráfica entre o desenho da *tag* e o programa de simulação.

Para iniciar o processo da simulação foi desenvolvido um algoritmo capaz de extrair dados do *software* GiD. Este *software*, é um programa de pré-processamento geométrico, onde nele é possível desenhar a *tag* a ser simulada pelo algoritmo e atribuir parâmetros eletromagnéticos necessários, como por exemplo, permissividade elétrica, permeabilidade magnética do meio e a atribuição e a definição da unidade de comprimento do desenho, visto que o programa não possui unidade dimensional.

Para iniciar o processo da simulação de RCS, o primeiro passo é desenhar a *tag* no plano YZ, e em seguida selecionar o tipo de problema, no caso deste trabalho o tipo “rcs”, que utiliza o método dos momentos. O algoritmo define uma fonte distante o suficiente para que as frentes de ondas eletromagnéticas incidentes no objeto possam ser consideradas planas e uniformes, que conseqüentemente geram uma diferença de potencial entre os pontos discretos. Também é necessário editar as propriedades da fonte como o ângulo de incidência, a frequência de operação, tipo de polarização e definir a permissividade elétrica e permeabilidade magnética, como mostrada na figura 6.

Figura 6 - Propriedades da fonte

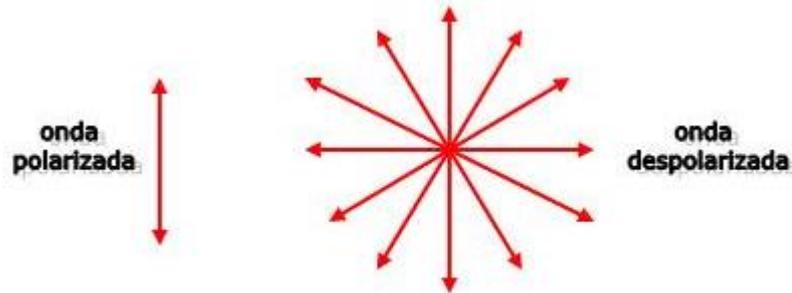
Problem Data	
Permissividade Elétrica (F/m):	8.854e-12
Permeabilidade Magnética (H/m):	1.257e-6
Unidade:	mm
Polarização de Incidência:	Vertical
Ângulo de Incidência (phi ^):	0
Frequência:	1e9
Área:	300

Accept data Close

Fonte: autora

A polarização de onda é o fenômeno em que uma onda transversal, vibrando em várias direções, tem uma de suas vibrações selecionadas através de um polarizador. A figura 7 ilustra uma onda polarizada verticalmente. No algoritmo, é possível escolher onda verticalmente ou horizontalmente polarizada.

Figura 7 – Onda polarizada

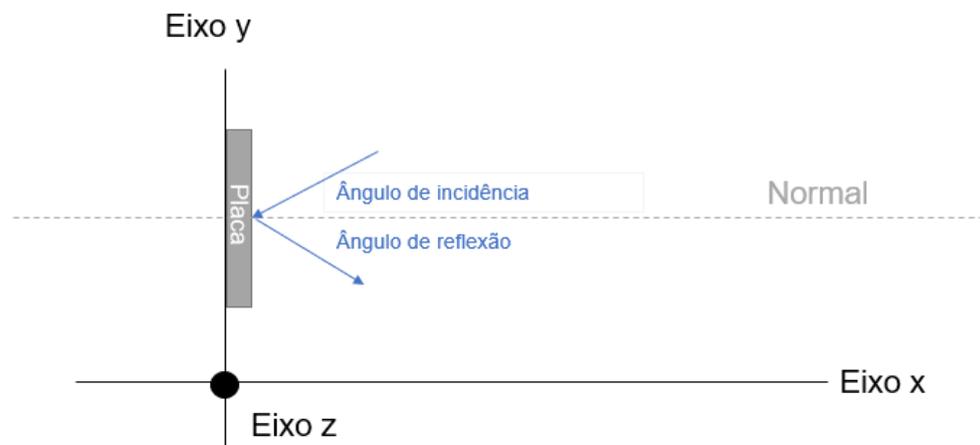


Fonte: ColegioWeb

No GiD a placa deve ser desenhada no plano YZ como mostra o esquema da figura 8, nesta etapa também deve-se escolher o ângulo de incidência desejado para a simulação do algoritmo.

A reflexão é um fenômeno que faz com que a onda incidente volte a se propagar no meio de origem após a incidência de um objeto. O ângulo de incidência e o ângulo de reflexão são medidos em relação a reta normal, que é sempre perpendicular à superfície do objeto.

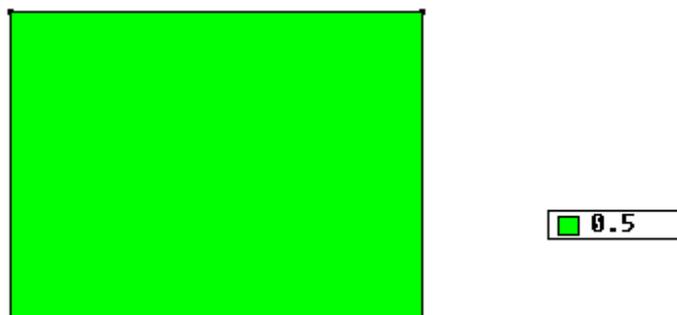
Figura 8 – Esquema do desenho e ângulos de incidência e reflexão



Fonte: autora

O próximo passo é definir a espessura da placa a ser simulada, na figura 9 a placa lisa condutora é definida com uma espessura de 0,5 mm.

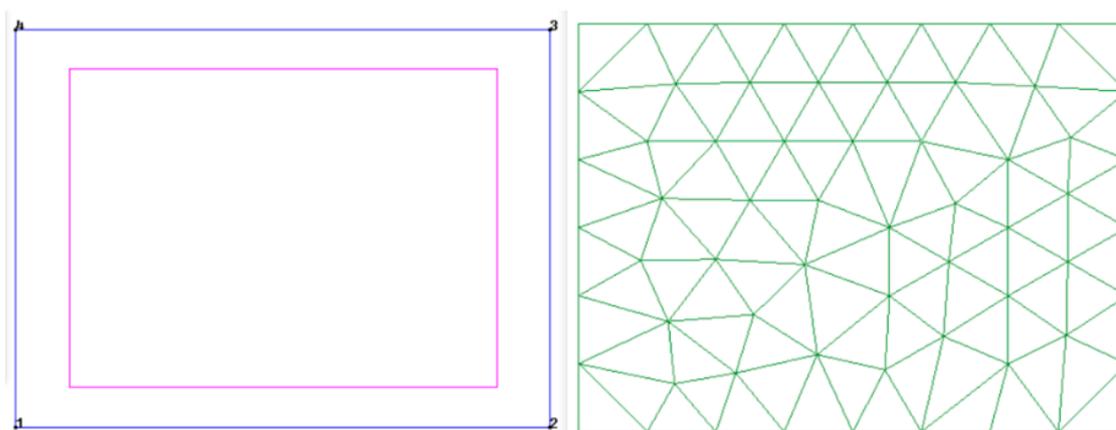
Figura 9 – Placa lisa condutora com espessura de 0,5mm



Fonte: autora

Uma vez que o objeto está corretamente desenhado e com espessura definida, o programa discretiza o desenho. O resultado é uma subdivisão de formatos triangulares menores, onde o tamanho da aresta de cada triângulo é definida pelo usuário do algoritmo e essa subdivisão é mostrada na figura 10. A esquerda é o desenho de uma placa lisa retangular no GiD, as linhas em rosa significam que há uma superfície formada pelas linhas em azul, que são os segmentos de reta ligados pelos pontos 1,2,3 e 4. E a direita as linhas em verde mostram a discretização da superfície retangular.

Figura 10 – A esquerda desenho geométrico no GiD e a direita após a discretização



Fonte: autora

A partir das coordenadas de cada segmento de reta é calculada a tensão em cada ponto. Os cálculos são guardados em matrizes e posteriormente

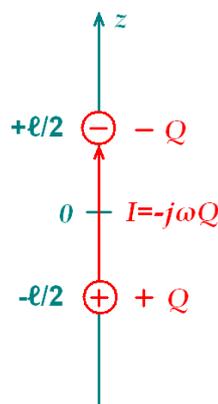
manuseadas pelo *software* chamado Matlab. Cada ponto associado a um nível de tensão se torna subsídio para o cálculo da distribuição de corrente da próxima etapa.

### 3.2. CÁLCULO NUMÉRICO DOS DADOS

Com os dados da discretização e definição de parâmetros eletromagnéticos mencionados na etapa anterior, foi utilizado o *software* Matlab para auxílio dos cálculos numéricos e simulação dos dados. O objetivo desta etapa é com os dados fornecidos pelo processamento geométrico calcular o RCS em três etapas: na primeira calcula-se a distribuição de corrente na placa, na segunda o campo elétrico e por último o RCS na terceira etapa.

Assim, para a primeira etapa é necessário escrever a equação de potencial elétrico ( $\Phi$ ) dependente da carga 'q' como mostra a equação (3), em função da corrente  $\vec{J}$ . Isso é possível pois a diferença de potencial gerada por duas cargas diferentes produz uma corrente descrita em função das cargas, ilustrado pela figura 11. E da mesma forma, a carga pode ser descrita em função da corrente como mostrado na equação (4). Assim, substituindo a equação (4) na equação (3), é possível reescrever a equação do potencial elétrico em função da corrente.

Figura 11 – Corrente gerada por cargas



Fonte: Artuzzi, 2018

O potencial magnético ( $\vec{A}$ ) mostrado na equação (5), é calculado em função da corrente. E como a diferença de potencial é conhecida (dado retirado extraído do  $Gid$ ), utilizando a equação (6) calcula-se a corrente.

$$\Phi = \sum \frac{q}{4\pi\epsilon} \frac{e^{-jkR}}{R} \quad (3)$$

$$q = \frac{\vec{I}}{-j\omega} \quad (4)$$

$$\vec{A} = \sum \frac{\mu}{4\pi} \int_1^2 \vec{I} \frac{e^{-jkR}}{R} \quad (5)$$

$$V_{21} = (\Phi_2 - \Phi_1) + j\omega \int_1^2 \vec{A} \cdot \vec{d}_l \quad (6)$$

A segunda etapa do cálculo é encontrar o campo elétrico mostrada na equação (7), essa forma descrita é a equação para o cálculo de campo elétrico simplificado para campo distante. Por fim, o RCS pode ser calculado pela equação (2), mostrada anteriormente no item 2.2.

$$\vec{E} = -j\omega\vec{A} \quad (7)$$

A Tabela 1 identifica o nome de cada símbolo.

Tabela 1 – Lista de símbolo das equações mencionadas

Símbolo	Nome
$\Phi$	Potencial elétrico
$q$	Carga
$\epsilon$	Permissividade elétrica
$R$	Distância entre pontos
$\vec{A}$	Potencial magnético
$\mu$	Permeabilidade magnética
$\vec{I}$	Distribuição de corrente
$\omega$	Frequência
$\vec{E}$	Campo elétrico

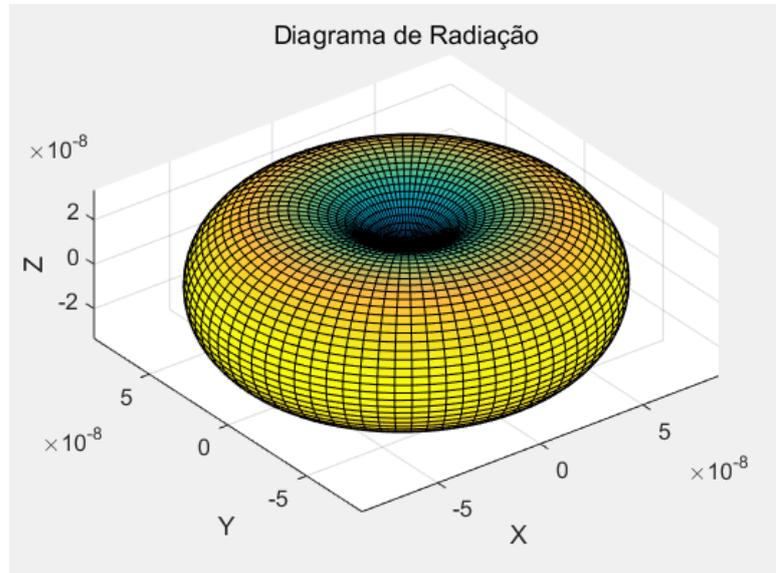
Fonte: autora

### 3.3. DIAGRAMA DE RCS

Após o cálculo numérico, no Matlab, extraem-se três diagramas de RCS. No primeiro diagrama (figura 12) é ilustrado o espalhamento tridimensional, resultado da simulação da placa lisa da figura 8 com tamanho de 15 mm por 20 mm na frequência de 1 GHz, polarização vertical, ângulo de incidência máxima igual a zero, pois este é medido em relação a normal. O diagrama 2 (figura 13) mostra o RCS visto do plano XY e o diagrama 3 (figura 14) no plano XZ. Em

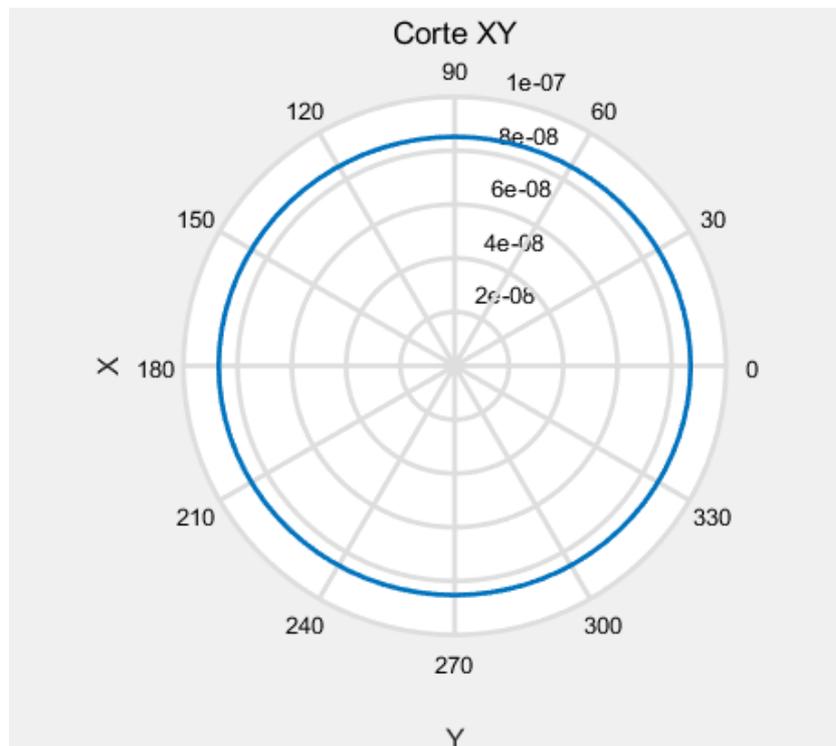
ambos o raio da circunferência é o RCS em dBsm visto em diferentes ângulos de reflexão na placa.

Figura 12 - Diagrama de radiação tridimensional



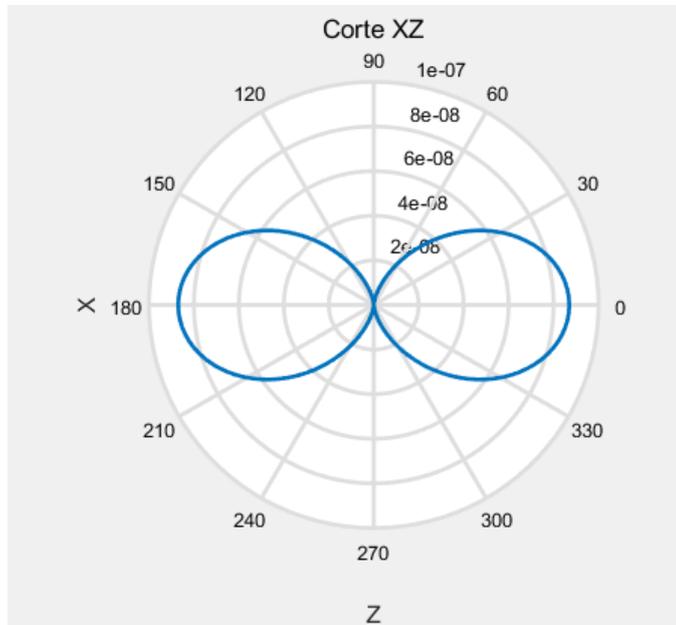
Fonte: autora

Figura 13 – Diagrama de RCS para corte XY para ângulos de reflexão diferentes



Fonte: autora

Figura 14 Diagrama de RCS para corte XZ para ângulos de reflexão diferentes



Fonte: autora

### 3.4. AVALIAÇÃO DO ALGORITMO

Para fins de avaliação do algoritmo desenvolvido, foi simulado uma placa lisa condutora no tamanho de 15 mm a 20 mm. O resultado foi comparado com o teórico calculado pela equação (1), com a simulação de uma função existente no *software* do Matlab chamada de *“rcs\_rect\_plate”* e com as variações de espessura e tamanho de segmento do parâmetro do método dos momentos.

### 3.5. TAG

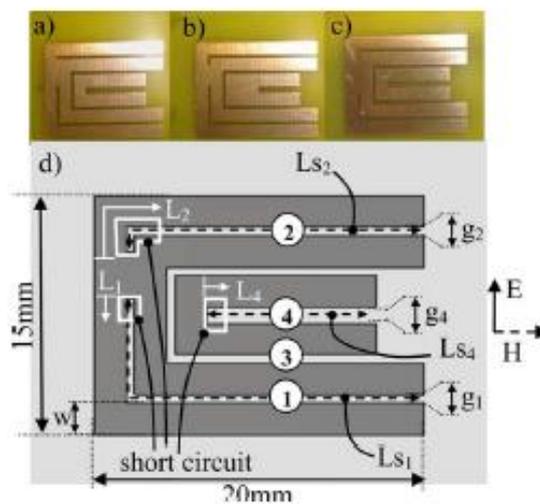
A *tag* passiva a ser simulada é mostrada na figura 15, o design dela foi proposto pelos autores V. Arnaud, P. Etienne, e T. Tedjini. Ela é do tipo passiva, sem chip e com retroespalhamento. O *design* da placa é formado por quatro circuitos ressonadores que alteram a característica de frequência na faixa de cada ressonador. O substrato é de FR-4 com espessura de 0,8 mm e espessura do condutor de 0,035 mm.

A geometria dessa *tag* é composta por 4 circuitos ressonadores no formato “C”. Ao alterar as medidas de  $Ls_1$ ,  $Ls_2$  e  $Ls_4$  é possível deslocar as frequências de ressonância. A codificação foi projetada para as frequências entre 2 GHz a 5,5 GHz utilizando apenas os ressonadores 1,2 e 4. O ressonador

3 não é utilizado pois sofre influência dos outros ressonadores, por isso serve também para distanciar o ressonador 1 e 2 do ressonador 4. Com pequenos deslocamentos da frequência de ressonância é possível associar códigos diferentes e únicos.

Esse modelo de design possibilita 768 combinações diferentes de códigos com 50 MHz de resolução. (Vena, A.; Perret, E.; Tedjni, S, 2012).

Figura 15 – Tag a ser simulada



Fonte: Transaction on Microwave theory and technique, 2012

Para este trabalho foram utilizadas as medidas  $L_{s1}$ ,  $L_{s2}$  e  $L_{s4}$  da tag 1 mostrada na tabela 3. Para esses valores a codificação resultante é de “0.2.1”. As frequências de ressonância para os ressonadores estão mostrado na tabela 2, onde para o código “0” do primeiro ressonador é de 2 GHz, para o segundo ressonador o “2” é de 2,5 GHz e o “1” do terceiro ressonador é de 4,1 GHz.

Tabela 2 – Frequências de ressonância para cada código

Resonator 1, Ls=24.7mm			Resonator 2, Ls=20.3mm			Resonator 4, Ls=11.1mm		
code	fr1 calc., GHz	L <sub>1</sub> , mm	code	fr2 calc., GHz	L <sub>2</sub> , mm	code	fr4 calc., GHz	L <sub>4</sub> , mm
0	2	0	0	2.4	0	0	4	0
1	2.05	0.65	1	2.45	0.5	1	4.1	0.32
2	2.1	1.25	2	2.5	0.92	2	4.2	0.62
3	2.15	1.85	3	2.55	1.34	3	4.3	0.93
4	2.2	2.42	4	2.60	1.74	4	4.4	1.20
5	2.25	3	5	2.65	2.12	...	...	...
6	2.3	3.5				15	5.4	3.37
7	2.35	4				16	5.5	3.5

Fonte: Transaction on Microwave theory and technique, 2012

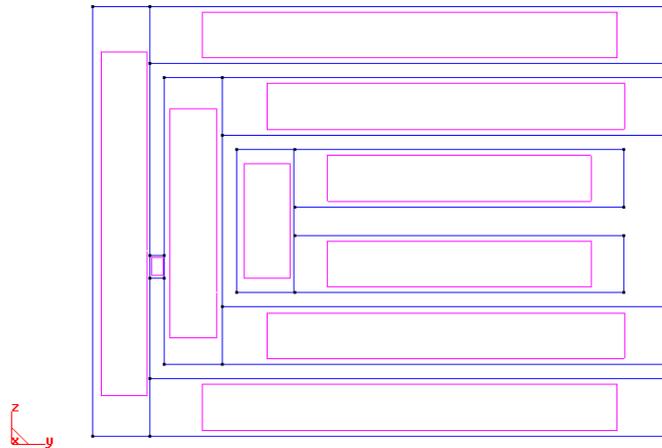
Tabela 3 – Tamanho de cada ressonador por exemplo de código

	code	Ls <sub>1</sub>	L <sub>1</sub>	Ls <sub>2</sub>	L <sub>2</sub>	Ls <sub>4</sub>	L <sub>4</sub>
Tag 1	0.2.1	24.7	0	20.3	0.92	11.1	0.32
Tag 2	5.0.1	24.7	3	20.3	0	11.1	0.32
Tag 3	0.0.15	24.7	0	20.3	0	11.1	3.5
Tag 4	3.0.1	24.7	1.85	20.3	0	11.1	0.32
Tag 5	0.1.1	24.7	0	20.3	0.5	11.1	0.32

Fonte: Transaction on Microwave theory and technique, 2012

O processo inicial de simulação da *tag* é mostrado na figura 16, ilustração da *tag* 1 no *software* *Gid*. Com a *tag* já desenhada, é necessário alterar a espessura do condutor a ser simulado, para isso nas opções de condições de plano altera-se a espessura para 0,035 mm como mostra a figura 17. A Figura 18 mostra a mesma *tag* já subdividida em segmentos de reta de comprimento de 0,5 mm.

Figura 16 – A tag desenhada no GiD para simulação



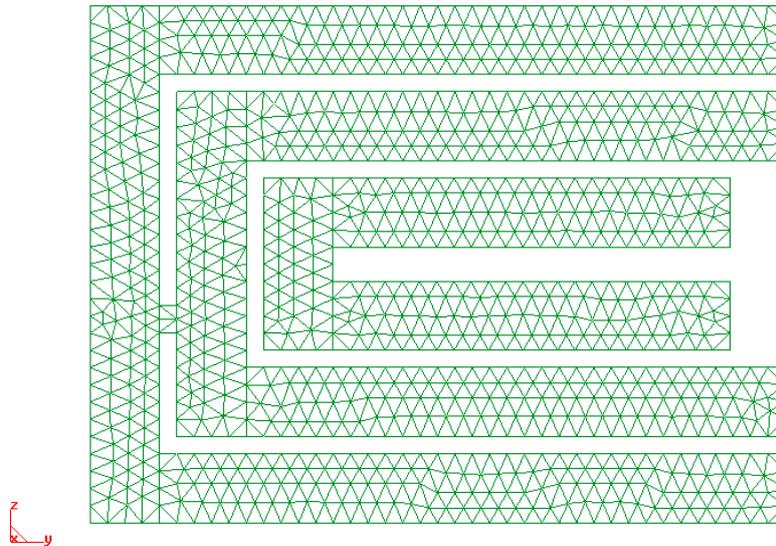
Fonte: autora

Figura 17 – Tag com espessura de 0,035 mm



Fonte: autora

Figura 18 - Discretização da tag

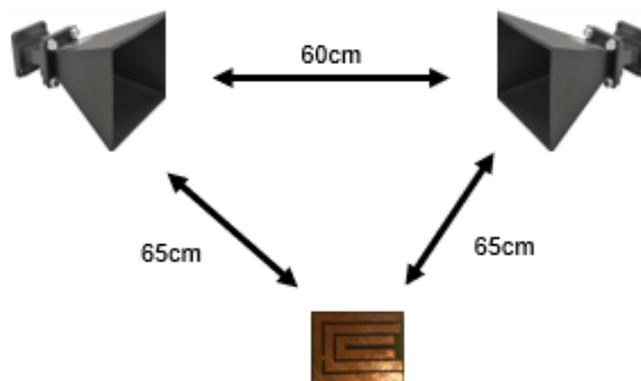


Fonte: autora

A figura 20 mostra a etiqueta confeccionada para medição na câmara anecóica. O substrato utilizado foi o FR-4 com espessura de 0,8 mm.

Para a medição tanto da *tag* quanto da placa lisa metálica foram utilizadas duas antenas do tipo *horn* na configuração mostrada na Figura 19. Em ambos os objetos foram montados em uma altura de 60 cm do chão. A câmara anecóica utilizada foi a do laboratório de eletromagnetismo da Universidade Federal do Paraná dentro do departamento de Engenharia Elétrica.

Figura 19 – Esquema de medição na câmara anecoica



Fonte: autora

Figura 20 – Tag confeccionada



Fonte: autora

Ao utilizar o esquema da figura 19, o resultado é o parâmetro de espalhamento  $\sigma_{21}$ . Para obter o RCS a partir do parâmetro de espalhamento utiliza-se a equação (8), onde  $\sigma_{21}$  é o parâmetro de espalhamento da tag, o  $\sigma'_{21}$  é o parâmetro de espalhamento da placa lisa de 15 mm por 20 mm de comprimento e  $\sigma'$  é o RCS calculado da placa lisa.

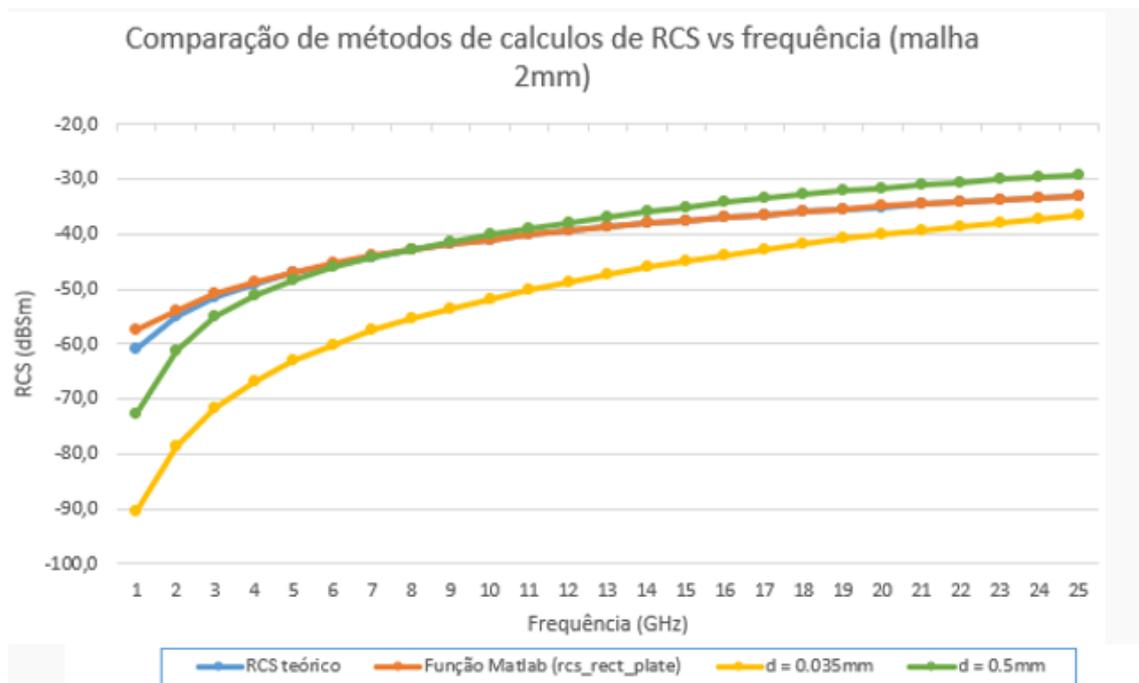
$$RCS_{medido}_{dBsm} = S_{21} - S'_{21} + \sigma'_{dBsm} \quad (8)$$

## 4. RESULTADOS

### 4.1. AVALIAÇÃO DO ALGORITMO

Primeiramente, para fins de avaliação do algoritmo utilizado na simulação de RCS, foi simulada a mesma placa lisa condutora no tamanho de 20 mm por 15 mm da figura 10 com uma malha de 2 mm e outra de 0,7 mm de segmento de reta, com espessura do condutor de 0,035 mm e 0,5 mm de espessura na faixa de frequência de 1 GHz a 25 GHz. Os resultados dessa simulação foram comparados com o RCS calculado utilizando a equação (1) e com o método de cálculo de RCS utilizando a função chamada “*rsc\_rect\_plate*” desenvolvida pelo autor Mahafza, B.R. no livro “*Radar Systems Analysis and Design using Matlab*”. Os dados são mostrados em dBSm.

Figura 21 – Comparação dos métodos de cálculo RCS com malha de 2 mm

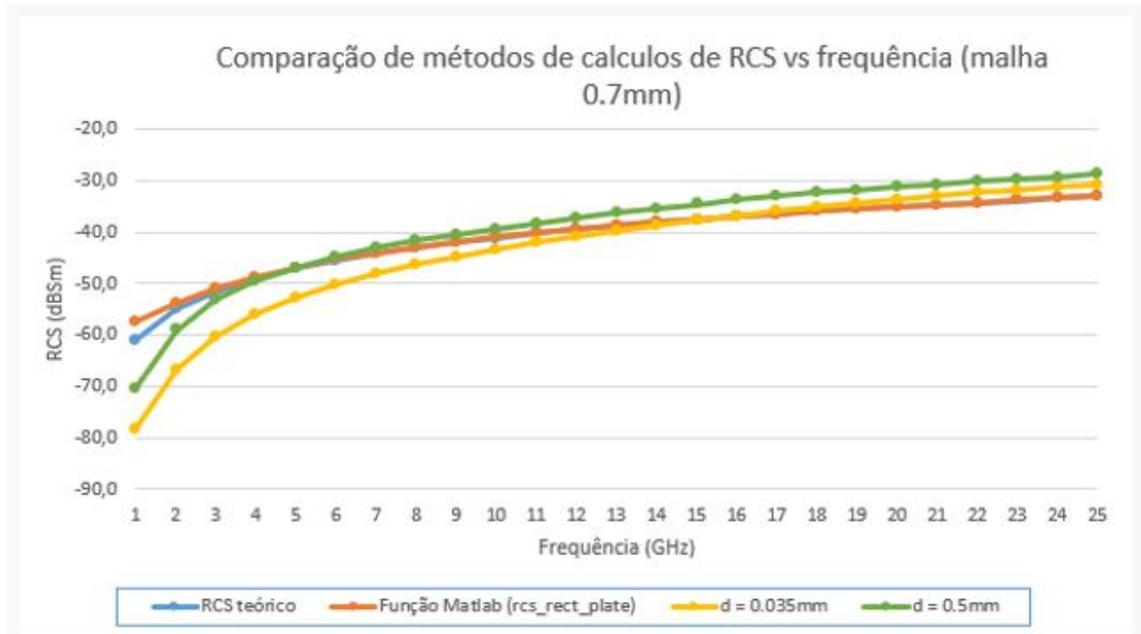


Fonte: autora

A figura 21 mostra a comparação dos métodos por frequência com uma malha de 2mm de segmento de reta. A linha em azul mostra o resultado do RCS teórico calculado, em laranja utilizando se a função “*rsc\_rect\_plate*” e em amarelo e verde mostram os resultados da simulação utilizando o algoritmo apresentado neste trabalho. A diferença entre as linhas é em função da espessura do condutor.

A figura 22 também mostra a mesma comparação dos métodos, mas com a diferença do tamanho da malha, neste caso a malha é de 0,7mm. As cores da legenda se mantêm as mesmas da figura anterior.

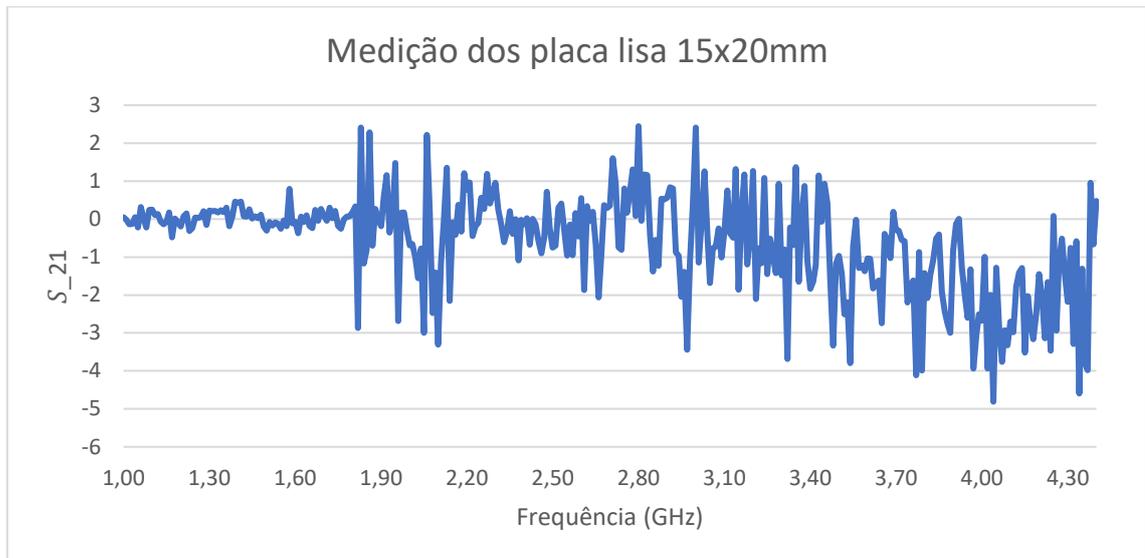
Figura 22 – Comparação de métodos calculados de RCS com malha de 0,7mm



Fonte: autora

Comparando os resultados, nota-se que todos os métodos de simulação de RCS testados tendem a convergir para o mesmo valor em frequências altas. Na Figura 23 mostra o parâmetro de espalhamento  $\sigma_{21}$  da placa lisa medida, essa medição foi necessária para a extração do RCS da posterior medição da tag.

Figura 23 – Parâmetro de espalhamento  $S_{21}$  da placa lisa na câmara anecoica

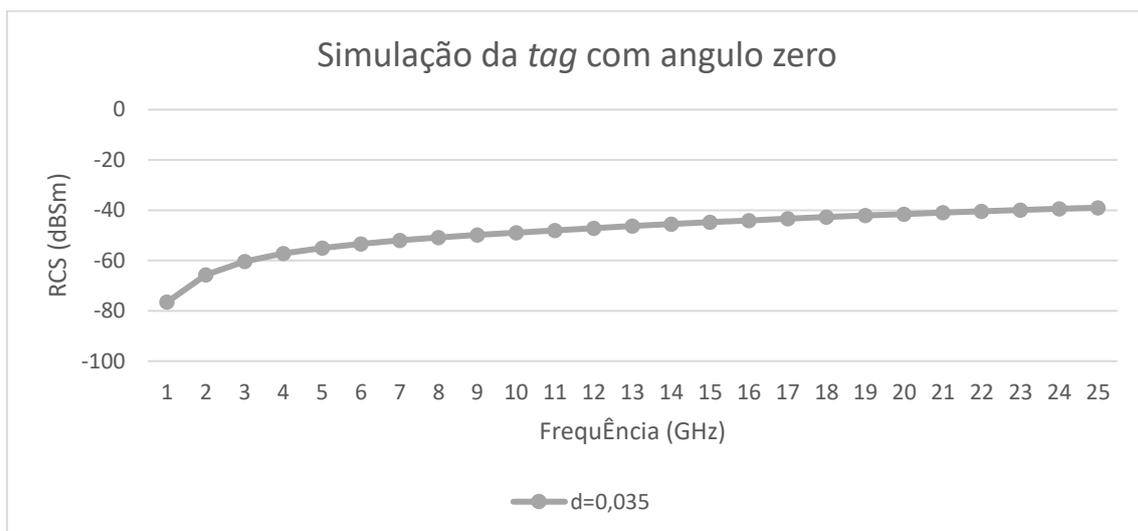


Fonte: autora

#### 4.2. SIMULAÇÃO E MEDIÇÃO DA TAG

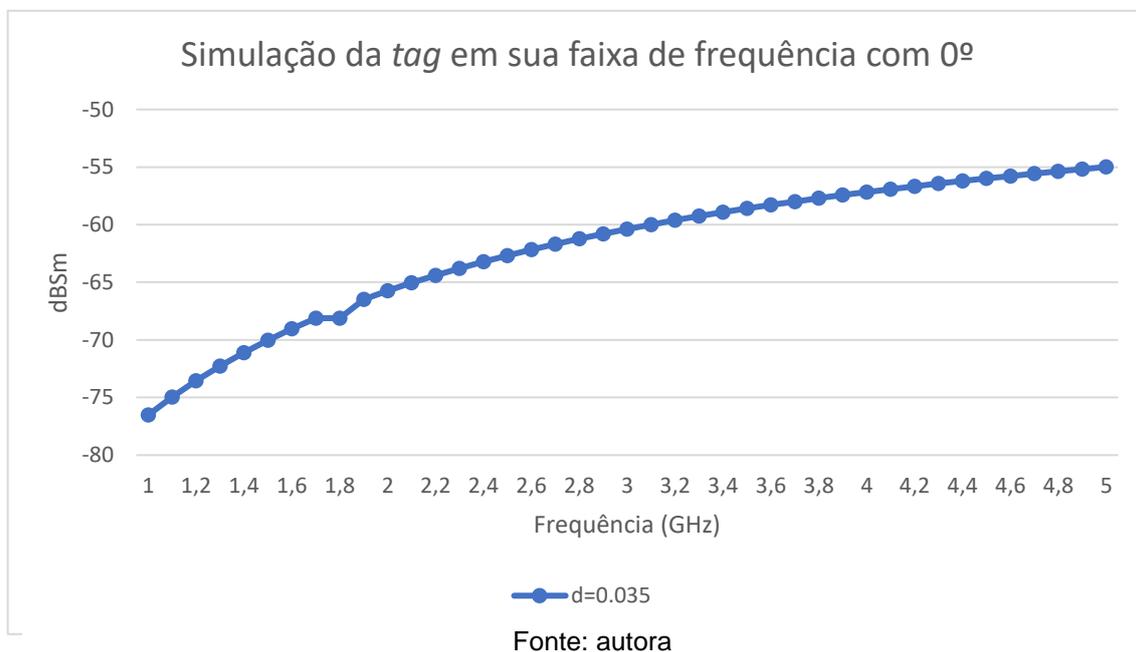
A simulação da *tag* com espessura do condutor de 0,035 mm, na faixa de frequência de 1 a 25 GHz, polarização vertical e ângulo de incidência de zero grau é mostrada na figura 24. E o mesmo gráfico ampliado para a faixa de frequência de operação da *tag*, de 1 a 5 GHz, é mostrado na figura 25.

Figura 24 – Simulação da *tag* com ângulo de incidência de zero graus



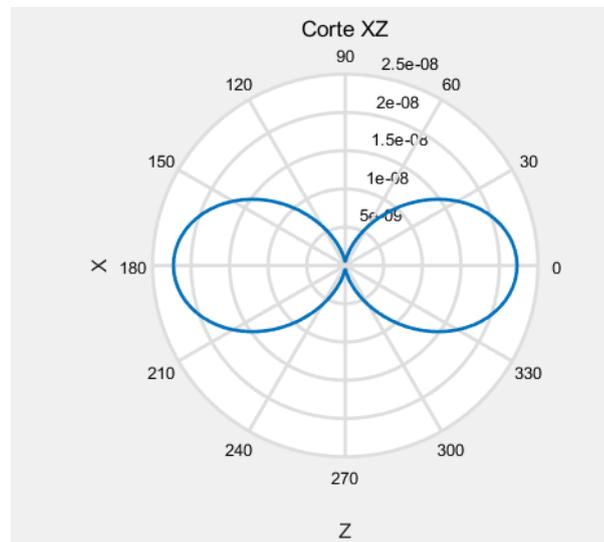
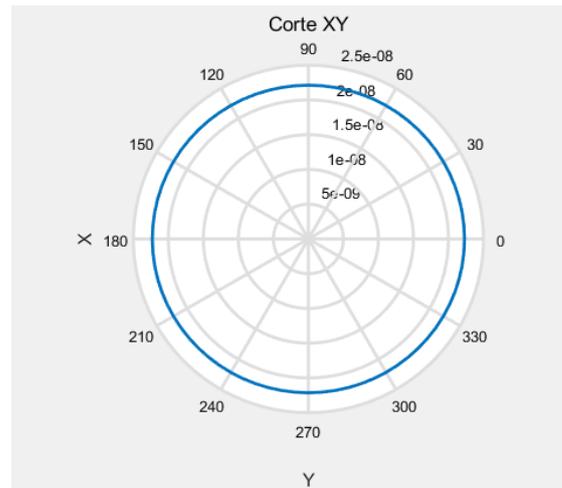
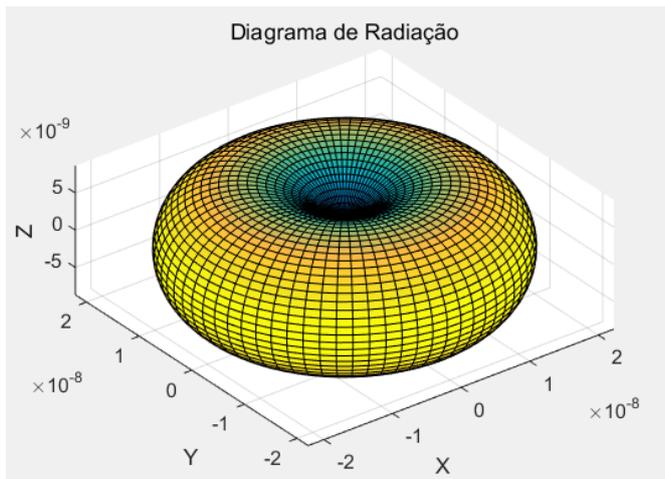
Fonte: autora

Figura 25 – Simulação da *tag* em sua faixa de frequência de operação com ângulo zero de incidência



Para a obtenção dos dados de uma faixa de frequência, foi necessária a simulação para cada frequência distinta. Em outras palavras, o algoritmo RCS plota o diagrama de RCS para ângulos de reflexão diferentes em apenas uma frequência de incidência. Dessa forma, pelo diagrama de corte XY, o valor a ser utilizado para a análise é o análogo a zero grau. A figura 26, mostra os três diagramas resultantes da *tag* quando a fonte apresenta ângulo de incidência de zero grau na frequência de 1 GHz.

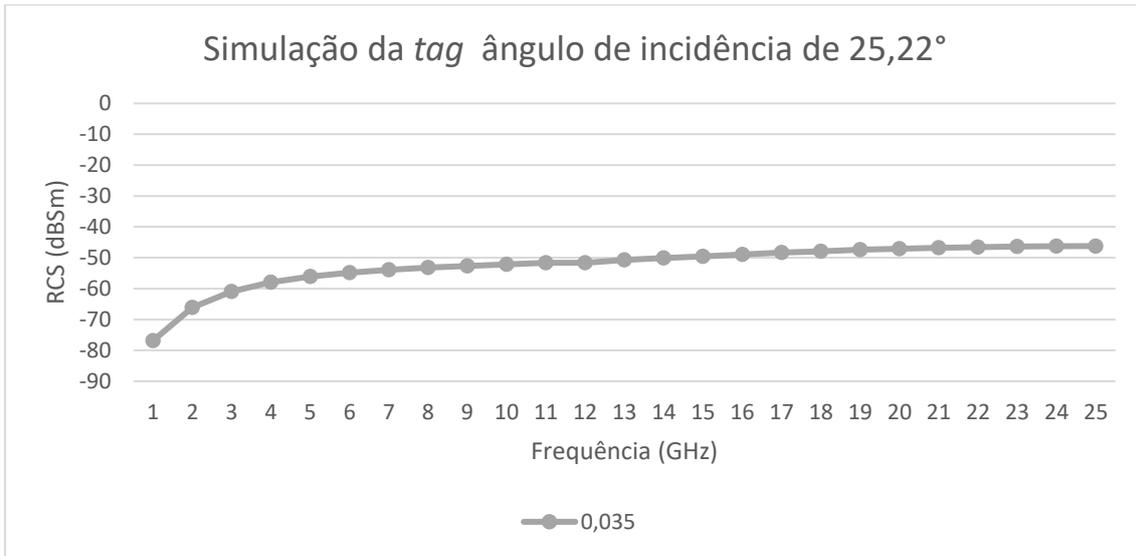
Figura 26 – Diagrama de RCS tridimensional, com corte XY e XZ



Fonte: autora

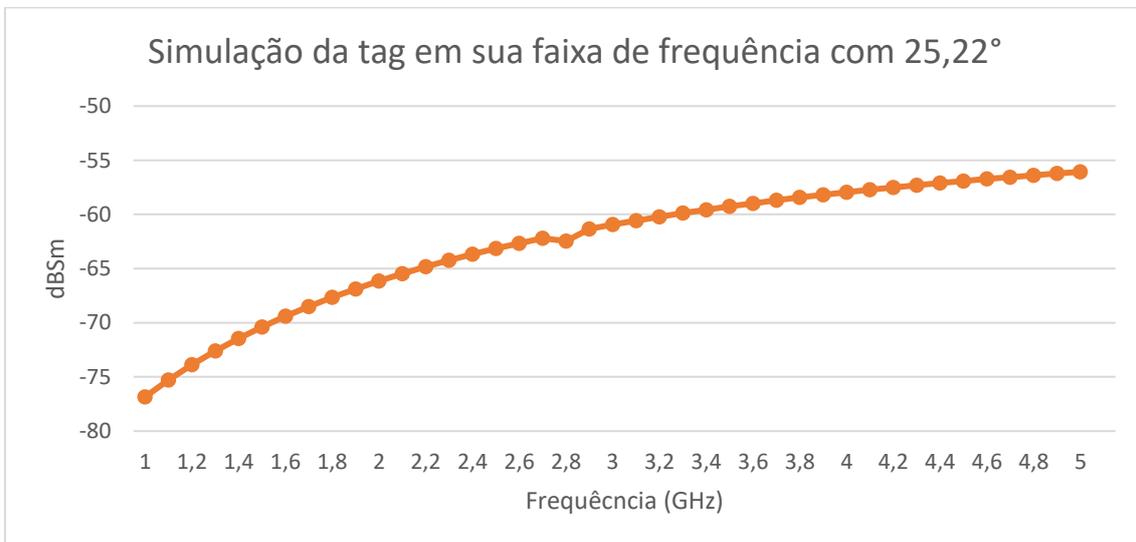
Ao alterar o ângulo de incidência da fonte de  $0^\circ$  para  $25,22^\circ$ , utilizando a mesma espessura de condutor e faixa de frequência, obteve-se a Figura 27. O mesmo gráfico ampliado para a frequência de operação é mostrado na Figura 28.

Figura 27 – Simulação da tag com ângulo de incidência da fonte de 25,22°



Fonte: autora

Figura 28 - Simulação da tag em sua faixa de frequência de operação com ângulo 25,22° de incidência

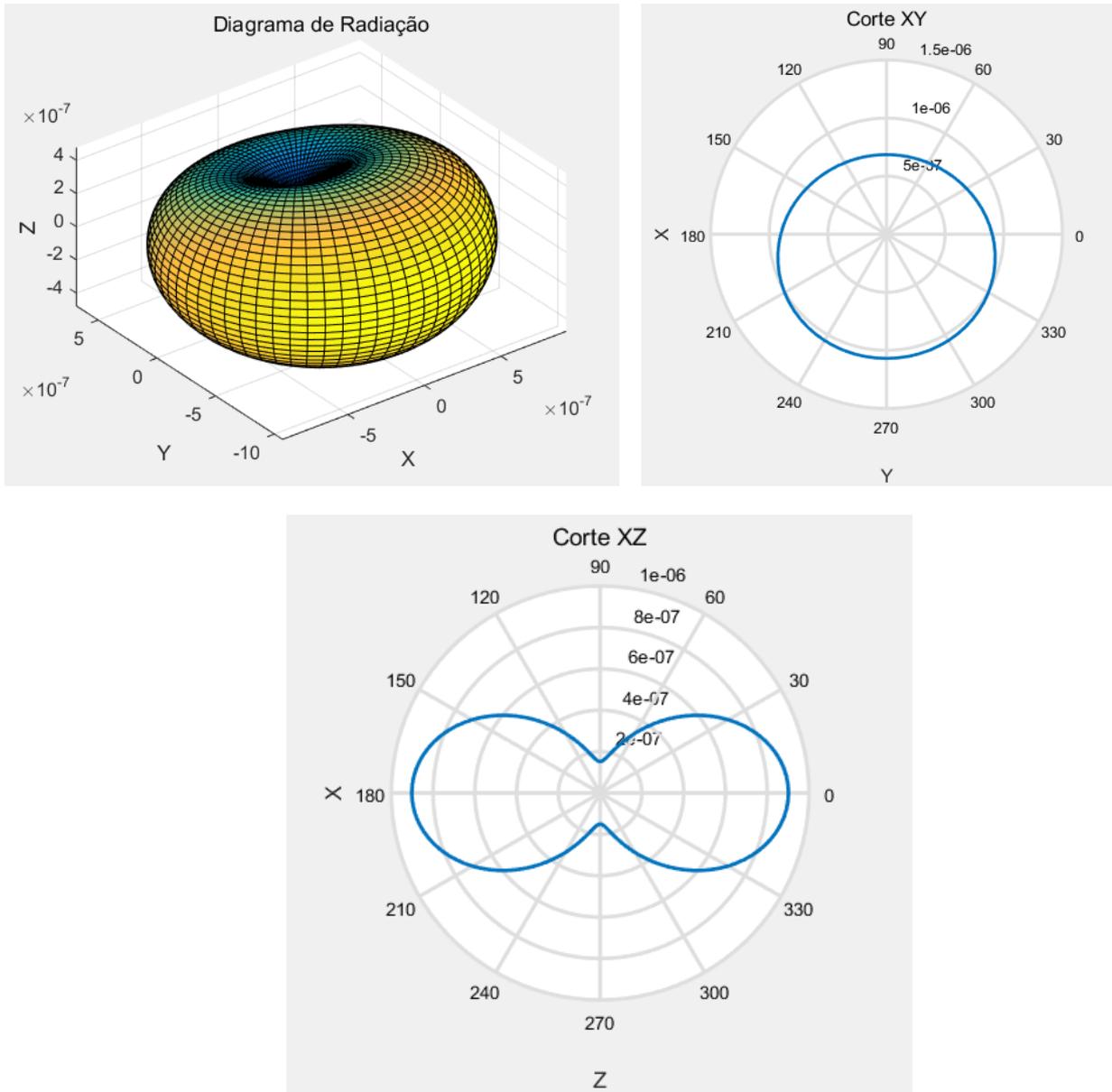


Fonte: autora

Assim como foi realizado para zero grau, para analisar o RCS de uma faixa de frequência, são necessárias várias simulações alterando apenas o valor da frequência de incidência. Para ilustrar um dos resultados, a figura 29 mostra a simulação com um ângulo de 25,22° de incidência com polarização vertical. Nota-se que com ângulos de polarização diferentes de zero, o diagrama se altera

para ângulos de reflexão diferentes, ou seja, o diagrama mostra uma circunferência deslocada do centro.

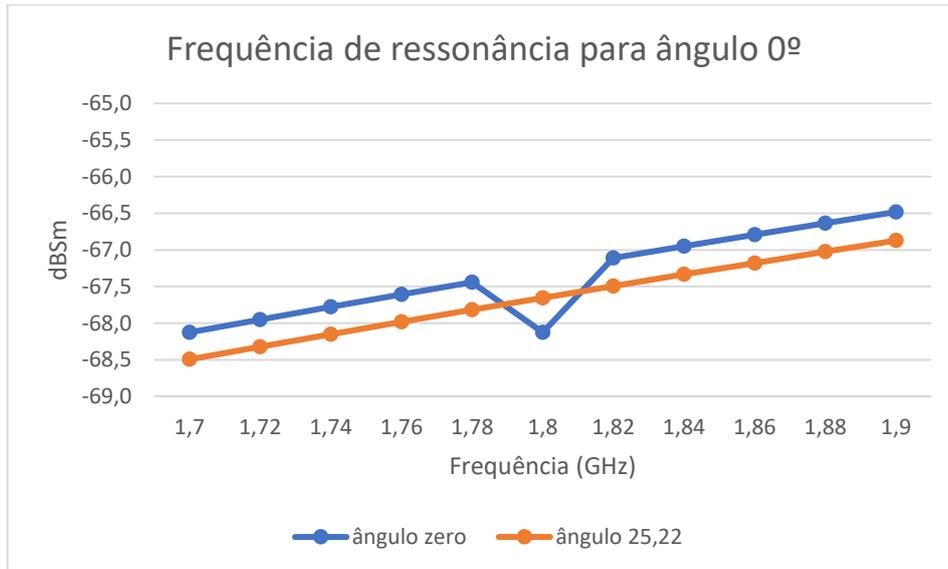
Figura 29 – Diagramas de RCS para ângulo de incidência de  $25,22^\circ$



Fonte: autora

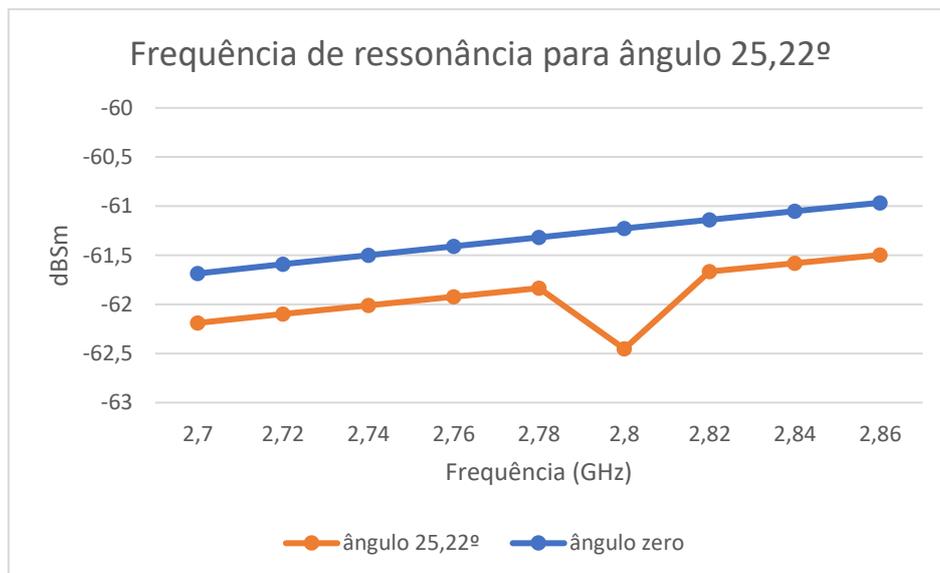
A simulação da *tag* com ângulo zero de incidência mostrou uma ressonância na frequência de 1,8 GHz e 2,8 GHz com  $25,22^\circ$ . A figura 30 e figura 31 comparam as ressonâncias mostrada na figura 25 e figura 28, respectivamente.

Figura 30 – Comparação da frequência de ressonância para ângulo 0°



Fonte: autora

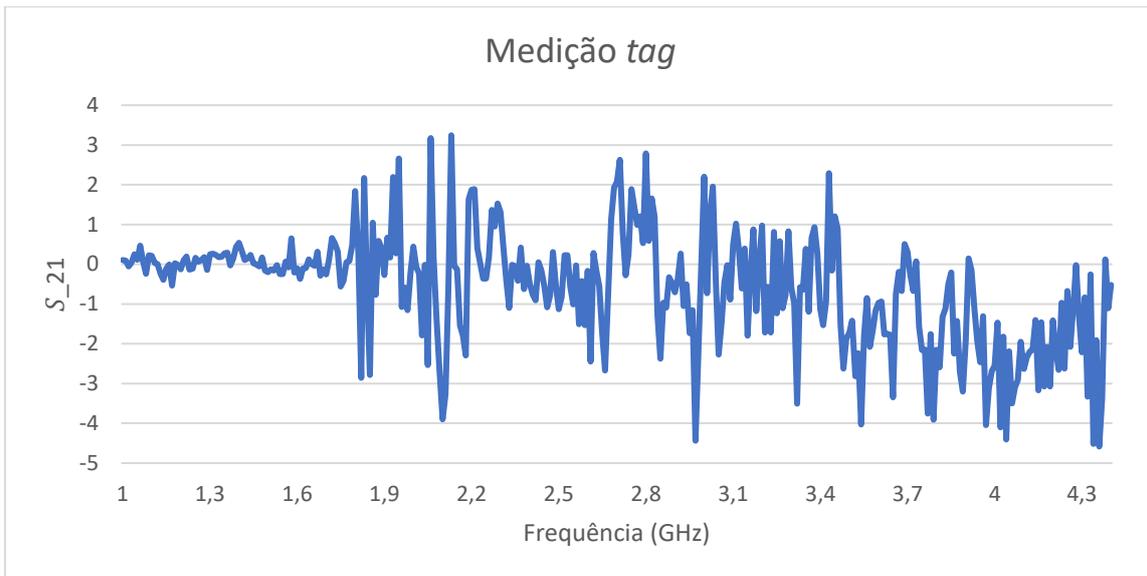
Figura 31 - Comparação da frequência de ressonância para ângulo 25,22°



Fonte: autora

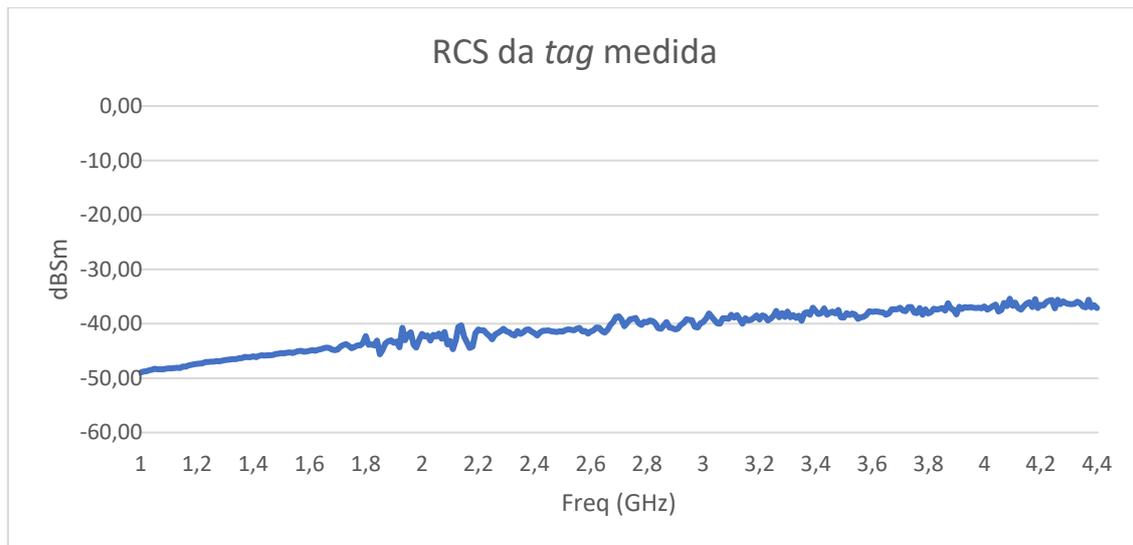
Por fim, o resultado do parâmetro de espalhamento  $\sigma_{21}$  da tag medida dentro da câmara anecóica é mostrado na figura 32. Utilizando os dados desse parâmetro e o parâmetro de referência (placa lisa) medido, o RCS resultante é mostrado na figura 33.

Figura 32 – Parâmetro de espalhamento  $S_{21}$  da tag na câmara anecoica



Fonte: autora

Figura 33 – RCS calculado a partir das medições



Fonte: autora

## 5. ANÁLISE E CONCLUSÃO

### 5.1. ANÁLISE DOS DADOS

Em relação a análise das diferentes formas de cálculo de RCS, conclui-se que para altas frequências todos os métodos de cálculo tendem a um mesmo valor, o que torna o algoritmo confiável para frequências acima 15 GHz. Já em frequências menores e se tratando em relação a avaliação do algoritmo deste trabalho, foi possível notar que a alteração de espessura variou significativamente os resultados em dBsm. Porém, vale lembrar que a espessura do condutor não é levada em conta tanto para o RCS calculado pela equação (1) quanto pela função *"rsc\_rect\_plate"*. Por esse ponto, o algoritmo desenvolvido se torna bastante interessante, pois esse parâmetro é considerado. E como a *tag* proposta para estudo foi construída com espessura de condutor de 0,035mm manteve-se essa espessura para a simulação posterior. Além disso, apesar do resultado da espessura de 0,5 mm se aproximar mais do RCS calculado em baixa frequência, percebe-se que após frequência de 5 GHz ela ultrapassa o valor calculado. Além da espessura, outro fator importante que altera o resultado para frequências mais baixas é o potencial elétrico. Pois quanto menor a frequência, maior é o seu efeito, isso pode ser verificado a partir da equação (3). Enquanto que o potencial magnético se mantém sempre presente.

Outro ponto a ser observado pela comparação de métodos de cálculo de RCS, é em relação a variação dos parâmetros do método dos momentos. Pode-se notar que utilizando o segmento de reta de 0,7 mm o resultado se tornou mais coerente em relação ao de 2 mm para ambas espessuras. Isso ocorre devido ao fato de que a redução do tamanho do segmento de reta possibilita um maior número de pontos a serem discretizados, gerando uma maior resolução nos resultados e tornando-a mais confiável.

A medida da placa lisa foi necessária para calcular o RCS da *tag* a partir dos parâmetros de espalhamento medidos. Essa medida, foi utilizado como referência para o cálculo do RCS da *tag*. Para a aquisição desses dados, foi utilizado a média móvel de 32 pontos e mesmo assim a medida resultante teve muito ruído.

A partir desses três pontos analisados, conclui-se que o algoritmo é capaz de calcular o RCS e tende ao seu valor teórico conforme aumento da frequência, mas ainda gera incerteza quanto a baixa frequência.

Em relação a *tag*, ela foi desenhada de tal forma que ao fazer uma varredura em frequência deveria aparecer a assinatura eletromagnética que possibilitasse a sua identificação única. Essa assinatura seria composta de pelo menos três frequências de ressonância diferentes de 2 GHz, 2,5 GHz e 4,1 GHz que identificam a *tag* com os dígitos de "021". Todavia, a curva característica se

comparando com a faixa de frequência de até 25 GHz, foi semelhante à da placa lisa, sem ressonância para essas frequências.

Como para gerar os dados desse resultado foram necessárias realizar 25 simulações para cada 1 GHz, a resolução pode não ter sido suficiente para a identificação de uma leve ressonância entre as 25 condições de frequência simuladas. Por essa razão foi simulado novamente com uma resolução maior, de 100 MHz, totalizando 41 pontos entre 1 GHz e 5 GHz. Essa faixa de frequência também representa a faixa necessária para identificação da assinatura da *tag* proposta.

Para o caso de ângulo de incidência de zero grau, foi possível identificar apenas uma pequena ressonância na frequência de 1,8 GHz. Para o caso do ângulo de  $22,25^\circ$  também foi identificado apenas uma ressonância na frequência de 2,8 GHz. Portanto, a ressonância variou com o ângulo de incidência.

Também é possível perceber que para o ângulo zero, o diagrama de RCS apresenta o mesmo valor independente do ângulo de reflexão visto. E enquanto que para o ângulo de  $25,22^\circ$  o RCS não é mais o mesmo. E na forma tridimensional isso é verificado com o “achatamento” de um dos lados.

Em relação a medida da *tag* na câmara anecóica, foi identificado nos parâmetros de espalhamento a forte presença de ruídos. Embora não foi possível identificar a presença da assinatura da *tag*, ao utilizar a equação (8) para calcular o RCS nota-se que a curva característica foi similar ao da placa lisa, mas com valores mais altos que o simulado. E a presença do ruído se manteve no resultado do RCS, impossibilitando das frequências de ressonâncias. E em relação a fabricação da *tag*, de fato ela se torna mais simples, visto que não houve dificuldade de sua fabricação de forma caseira.

Outro detalhe é que o ângulo de  $25,22^\circ$  foi escolhido por ser o ângulo de incidência calculado a partir das distâncias da *tag* em relação às antenas no esquema montado para medição na câmara anecóica, conforme figura 19.

## 5.2. CONCLUSÃO

Após a análise dos resultados pode-se concluir que o algoritmo é capaz de calcular o RCS em altas frequências, mas que principalmente para frequências mais baixas o resultado sobre grande influência da variação dos parâmetros do método dos momentos, também da sua espessura e efeito do potencial elétrico. Por isso, para se utilizar o algoritmo nessas condições sugere-se a avaliação frente a outros métodos de cálculos antes de usá-lo.

Ao aplicar o algoritmo na *tag*, foi possível analisar parâmetros diferentes do proposto pelo *designer* da *tag*, como por exemplo, a resposta de espalhamento do RCS para seus diferentes ângulos refletidos e planos distintos.

Em relação ao desempenho obtido para análise da *tag*, não foi como esperado. Nem as simulações e nem as medições foram capazes de identificar a assinatura eletromagnética. E como foi identificado frequências de ressonância diferentes para ângulos de incidência diferentes pode-se concluir que a assinatura eletromagnética não foi a mesma para qualquer ângulo de incidência. E está análise não havia sido abordada anteriormente pelo designer da *tag* proposta.

### 5.3. TRABALHOS FUTUROS

Os sistemas de identificação de rádio frequência ainda estão em processo crescente de números de aplicações e está cada vez mais comum encontrá-los no dia a dia. Por isso, apesar das dificuldades encontradas neste trabalho o tema de *tags* passivas de RFID e sem chip é um tema que vale a pena se aprofundar.

Uma sugestão para trabalho futuro é realizar a medidas de RCS para *tags* mais simples, como por exemplo, apenas uma ressonância e com dimensões maiores na ordem de centímetros.

## REFERÊNCIA

VIOLINO, B. Roberti, M. The history of RFID technology. **RFID Journal**. 2005. Disponível em: <<https://www.rfidjournal.com/articles/pdf?1338> >. Acesso em: 30 de outubro 2018.

Das, R. RFID Forecast, Players and Opportunities 2017-2027. **IDTechEx**. 2007. Disponível em <<https://www.idtechex.com/research/reports/rfid-forecasts-players-and-opportunities-2017-2027-000546.asp?viewopt=showall#>>. Acesso em: 31 de outubro 2018.

Vena, A.;Perret, E.; Tedjini, S. Design of Compact and Auto-Compensated Single-Layer Chipless RFID Tag . **IEEE Transactions on microwave theory and techniques**, vol 60, N9, September 2012.

Karmakar, N.C. Tag, You're it! The Radar revolution looking towards future applications. **Microwave Magazine for the Microwave & Wireless Engineer, IEEE**, Vol 17, n. 7, July 2016.

Fletcher, R.R. Low-cost electromagnetic tagging: Design and implementation. **Ph.D. dissertation**, School of Architecture and Planning, Massachusetts Inst. Technology, Cambridge, MA, 2002.

CAFÉ,R **Radar cross Section. Wireless made simple**. 2004. Disponível em: <<http://www.rfcafe.com/references/electrical/ew-radar-handbook/radar-cross-section.htm> >. Acesso em: 07 de novembro 2018.

Tedjini, S., Karmakar,N., Perret, E., Vena, A., Koswatta, R., Azim, R. Hold the Chip. RFID Evolution Novel Areas of R&D. **Microwave Magazine for the Microwave & Wireless Engineer, IEEE**, Vol 14, n. 5, July 2013.

Casimiro, A. Lopes,V.Emidio,F. **Método dos Momentos**. Disponível em: <<https://core.ac.uk/download/pdf/61498052.pdf> >. Acesso em: 10 de novembro 2018.

JAGHER, E. Simulador de antenas filamentosas e superficiais utilizando o método dos momentos. **Dissertação de conclusão de curso** – Curso de Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Novembro 2014.

Amin, E.M., Karmakar, N.C., Jensen, B.W.; Fully Printable chipless RFID multi-parameter sensor. **Sensor and Actuators A: Physical**, 17 July 20. 16.

Balanis,C.A. **Antenna theory analysis and design**. United States of America: 2016, 4 th edition.

Harrington, R.F. **Field Computation by Moment Methods**. United States of Americas, Malabar Flórida :1968

Karmakar, N.C., Saha, J.K., Dey, S.; Smart sensing. Chipless RFID actualizing the Internet of Everything. **Microwave Magazine for the Microwave & Wireless Engineer, IEEE**, Vol 16, n.10, November 2015.

Mahafza, B.R. **Radar Systems Analysis and Design using Matlab**. Huntsville, Alabama, United States of America: 2000, by Chapman Hall/CRC.

Ramo, S.;Whinnery,J.R.;Duzer,T.V. **Campos e ondas em eletrônica das comunicações**. Tradução Rio de Janeiro: 1991.

Miacci, M.A.S, Nohara, E.L., Martin, I.M., Peixoto, G.G., Rezende, M.C.; **Indoor Radar Cross Section Measurements of Simple Targets**. Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Universidade de Taubaté, Instituto de Aeronáutica e Espaço. 2012.

Hu, C.F., Xu, J.D., Li, N.J. Zhang, L.X.; **Indoor accurate RCS measurement technique on UHF band**. Specialty Technique Key Laboratory of National Defense Technology Nortwestern Polytechnic University, 2008, China.

Shao, B., Chen, Q., Amin, Y., Liu, R., Zeng, L.R.; **Chipless RFID tags fabricated by fully printing of metallic inks**. Institut Mines-Télécom and Springer-Verlag France, 2013.

O'Donnell, R.M.; **Radar systems Engineering Lecture 7 part 2 Radar cross Section**. IEE New Hampshire Section. 2010

## ANEXO 1 – CÓDIGO DO PROGRAMA 'RCS' PARA MATLAB

```
%% versão: artuzi - 06/06/2018
clear all
close all

% variáveis globais
global epo muo

% importação dos dados do GiD e enumeração das arestas
gid

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Programa MOM %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%% limitação na frequência
L = sqrt(sum((xyz(map(:,1),:)-xyz(map(:,2),:)).^2,2))/unit;
F_max = 1/sqrt(muo**epo)/max(L**10)/1e9;

disp(['Frequência máxima no espaço livre: ' num2str(F_max) ' GHz'])

disp(['Polarização *GenData(4) incidente a *GenData(5)° em '
num2str(*GenData(6)/1e9) ' GHz'])

%% Geração da matriz Zmn %%
xyz = -xyz/unit;
a = espessura/2/unit;

%% %% Variáveis mutáveis
w = *GenData(6)**2**pi; % frequência angular (rad/Hz)
Elfot = find(tensao);
auxiliar = 1;
```

```

if length(Elfot)>1
    disp('Mais de uma fonte!');
end

phinc = *GenData(5)**pi/180;

if strcmp('*GenData(4)','Horizontal')
    einc = [sin(phinc) -cos(phinc) 0];    % 1 V/m

elseif strcmp('*GenData(4)','Vertical')

    einc = [0 0 1];    % 1 V/m

else

    einc = [0 0 0];    % 0 V/m

end

k = w**sqrt(epo**muo);

kinc = k**[-cos(phinc) -sin(phinc) 0];

ne = size(map,1);    % número de elementos
nn = size(xyz,1);    % número de nós

p = map(:,1);    % nós positivos por elemento
n = map(:,2);    % nós negativos por elemento

s = sparse(1:ne,p,1,ne,nn)... % matriz de incidência dos nós positivos...
- sparse(1:ne,n,1,ne,nn); % e negativos

M = (xyz(p,:)+xyz(n,:))/2; % ponto médio do elemento
L = (xyz(p,:)-xyz(n,:))/2; % vetores meio comprimento

L2 = 4**L**L';    % produtos escalares entre vetores comprimento

R = diag(a.^2); % quadrados dos raios

for i=1:size(xyz,2)

```

```

    po = M(:,i)**ones(1,ne);

    R = R + (po-po').^2;

end

R = sqrt(R); % distâncias centro a centro

A = L2.**exp(-1j**k**R)./R; % potencial vetor

ka = 2**a./sqrt(diag(L2));

d = diag(A);

A = A - diag(d);

d = d.**ka.**log((1+sqrt(ka.^2+1))./ka) - 1j**k**diag(L2);

A = A + diag(d);

R = ones(nn,ne)**diag(a.^2); % quadrados dos raios

for i=1:size(xyz,2)

    pn = xyz(:,i)**ones(1,ne);
    po = xyz(p,i)**ones(1,nn);

    R = R + (pn-po').^2;

end

R = sqrt(R);% distâncias nós positivos a nós

P = exp(-1j**k**R)./R; % potencial escalar gerado por nós positivos

R = ones(nn,ne)**diag(a.^2); % quadrados dos raios

for i=1:size(xyz,2)

    pn = xyz(:,i)**ones(1,ne);
    po = xyz(n,i)**ones(1,nn);

    R = R + (pn-po').^2;

```

```
end
```

```
R = sqrt(R); % distâncias nós negativos a nós
```

```
P = P - exp(-1j**k**R)./R; % potencial escalar gerado por nós negativos
```

```
P = s**P; % diferenças de potencial escalar por elemento
```

```
Z = (1j**w**muo**A+j**P/(w**epo))/(4**pi); % matriz de impedâncias
```

```
tensao = (L**einc').**exp(-1j**M**kinc'); % METADE DA TENSÃO (L=l/2)
```

```
I = Z\tensao; % correntes por elemento
```

```
ro = 100/sqrt(muo**epo)/w**2**pi; % distância da origem = 100 comprimentos de onda
```

```
N = 72;
```

```
[X,Y,Z] = sphere(N);
```

```
E2 = ones(N+1);
```

```
for i=1:N+1
```

```
    for o=1:N+1
```

```
        R = sqrt((X(i,o)**ro-M(:,1)).^2+(Y(i,o)**ro-M(:,2)).^2+(Z(i,o)**ro-M(:,3)).^2);
```

```
        Ex = -1j**w**L(:,1).**I.**exp(-1j**k**R)**muo/2/pi./R;
```

```
        Ey = -1j**w**L(:,2).**I.**exp(-1j**k**R)**muo/2/pi./R;
```

```
        Ez = -1j**w**L(:,3).**I.**exp(-1j**k**R)**muo/2/pi./R;
```

```
        E2(i,o) = (abs(sum(Y(i,o)**Ez-Z(i,o)**Ey))^2 ...  
                +abs(sum(Z(i,o)**Ex-X(i,o)**Ez))^2 ...  
                +abs(sum(X(i,o)**Ey-Y(i,o)**Ex))^2)**4**pi**ro^2;
```

```
    end
```

```
end
```

```
Pmax = max(max(E2))
```

```
Pmax = 10**log10(Pmax)
```

```
RCSmax = 10**log10((*GenData(7)**1e-6)^2**4**pi/(2**pi/k)^2)
```

```
figure  
surf(X.**E2,Y.**E2,Z.**E2,E2);  
axis 'equal'  
xlabel('X','FontSize',12,'FontWeight','demi')  
ylabel('Y','FontSize',12,'FontWeight','demi')  
zlabel('Z','FontSize',12,'FontWeight','demi')  
title('Diagrama de Radiação','FontSize',13,'FontWeight','demi')  
set(gca,'FontSize',12)  
set(gca,'FontWeight','demi')
```

```
l = N/2+1 ;  
c = 1:(N+1);  
theta = linspace(-pi,pi,(N+1));  
mod = zeros(N+1,1);  
for i=1:N+1  
    mod(i) = E2(l,c(i));  
end  
theta = theta';  
theta = [theta mod];  
theta = sortrows(theta,1);  
theta = [theta;theta(1,:)];  
figure
```

```
testeXY = polar(theta(:,1),theta(:,2));  
testeXY_X = testeXY.XData;  
testeXY_Y = testeXY.YData;
```

```
angulosXY = atan2d(testeXY_Y,testeXY_X);  
resultadoXY = (testeXY_X).^2+(testeXY_Y).^2;  
resultado_finalXY = sqrt(resultadoXY);
```

```
polar(theta(:,1),theta(:,2))  
set(findall(gcf,'type','line'),'LineWidth',2)  
xlabel('Y','FontSize',12,'FontWeight','demi')  
ylabel('X','FontSize',12,'FontWeight','demi')  
title ('Corte XY','FontSize',13,'FontWeight','demi')  
view(0,90)
```

```
c = [1 (N/2+1)];  
theta = zeros(N+1,2);
```

```

mod = theta;
for o=1:2
    for i=1:N+1
        theta(i,o) = atan2(Z(i,c(o)),X(i,c(o)));
        mod(i,o) = E2(i,c(o));
    end
end
theta = [theta(:,1);theta(:,2)];
mod = [mod(:,1);mod(:,2)];
theta = [theta mod];
theta = sortrows(theta,1);
theta(N/2,:) = [];
theta(N+N/2,:) = [];
theta = [theta(2**N,:);theta];
figure

polar(theta(:,1),theta(:,2))
set(findall(gcf,'type','line'),'LineWidth',2)
xlabel('Z','FontSize',12,'FontWeight','demi')
ylabel('X','FontSize',12,'FontWeight','demi')
title('Corte XZ','FontSize',13,'FontWeight','demi')
view(0,90)

```

## ANEXO 2 – EXTRAÇÃO DADOS DO GID

```
% *GenData(1) - *GenData(2) - *GenData(3)
```

```
% versão: Jagher - 26/03/2014
```

```
% Dados Gerais do Problema
```

```
mm = 1000;
```

```
cm = 100;
```

```
m = 1;
```

```
epo = *GenData(1);
```

```
muo = *GenData(2);
```

```
unit = *GenData(3);
```

```
clear mm cm m
```

```
nn = *npoin; % número de nós
```

```
% Dados da Malha
```

```
*realformat "%15.3f"
```

```
*set cond FIO
```

```
diametro = [
```

```
*loop elems OnlyInCond
```

```
*Cond(1)
```

```
*end
```

```
];
```

```
modulo = [
```

```
*loop elems OnlyInCond
```

```
*Cond(2)
```

```
*end
```

```
];
```

```
fase = [
```

```
*loop elems OnlyInCond
```

```
*Cond(3)
```

```
*end
```

```
];
```

```
line = [
```

```
*loop elems OnlyInCond
*ElemsConec
*end
];
```

% Triângulos

```
*set cond FILME
```

```
espessura = [
*loop elems OnlyInCond
*Cond(1)
*end
];
```

```
fil = [
*loop elems OnlyInCond
*ElemsConec
*end
];
```

% Coordenadas dos Nós

```
xyz = [
*loop nodes
*NodesCoord
*end
];
```

```
tic;
% Enumeracao das Arestas
fil = [fil ; 0 0 0];
[l,c] = size(fil);
if l~= 1
    fil = fil(1:l-1,:);
    map = [fil(:, [1 2])
           fil(:, [1 3])
           fil(:, [2 3])]; % nós das arestas de cada elemento
```

% eliminação das arestas repetidas

```

map1 = triu(sparse(map,fliplr(map),1));

% eliminação das arestas repetidas

map2 =
triu(sparse(map,fliplr(map),[espessura,espessura;espessura,espessura;espessura,espessura]));

[na1,na2,v1] = find(map1);
[na1,na2,v2] = find(map2);
map = [na1,na2];
espessura = v2./v1;

map = [map;line];
espessura = [espessura;diametro];
tensao =
[zeros(length(na1),1);modulo.**cos(2**pi**fase/360))+1j**modulo.**sin(2**pi**fase/360)];
else
map = line;
espessura = diametro;
tensao = modulo.**cos(2**pi**fase/360))+1j**modulo.**sin(2**pi**fase/360));
end

% padronização das coordenadas

[l,c] = size(xyz);
if c==2
xyz(:,3) = 0;
end

[na,c] = size(map);
disp('...')
disp([num2str(na) ' arestas identificadas em ' num2str(toc) ' s'])

clear c diametro fil l line

```