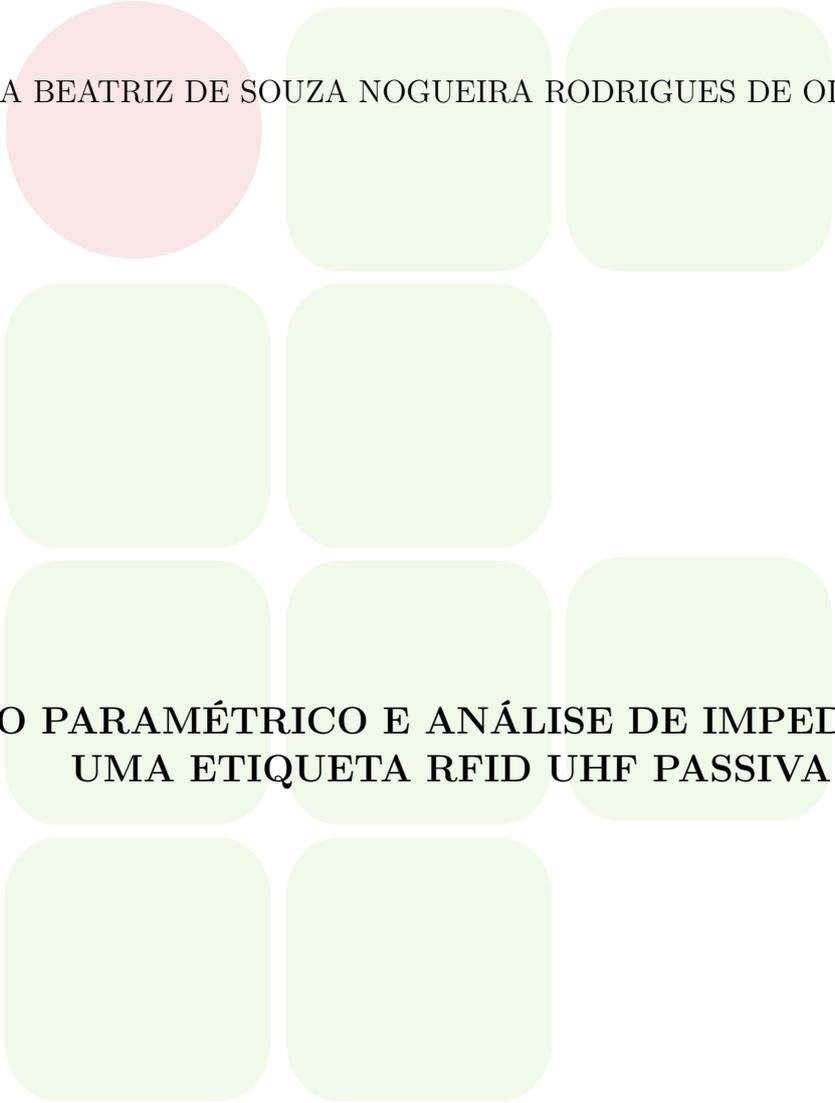


INSTITUTO FEDERAL DA PARAÍBA
COORDENAÇÃO DE CURSO BACHARELADO DE ENGENHARIA ELÉTRICA



ANA BEATRIZ DE SOUZA NOGUEIRA RODRIGUES DE OLIVEIRA

**ESTUDO PARAMÉTRICO E ANÁLISE DE IMPEDÂNCIA DE
UMA ETIQUETA RFID UHF PASSIVA**

João Pessoa
2023

ANA BEATRIZ DE SOUZA NOGUEIRA RODRIGUES DE OLIVEIRA

**ESTUDO PARAMÉTRICO E ANÁLISE DE IMPEDÂNCIA DE
UMA ETIQUETA RFID UHF PASSIVA**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal da Paraíba, como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Engenheira Eletricista.

Orientador: Patric Lacouth da Silva

João Pessoa
2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca Nilo Peçanha do IFPB, *campus* João Pessoa

O48e	<p>Oliveira, Ana Beatriz de Souza Nogueira Rodrigues de.</p> <p>Estudo paramétrico e análise de impedância de uma etiqueta RFID UHF passiva / Ana Beatriz de Souza Nogueira Rodrigues de Oliveira. – 2023. 36 f. : il.</p> <p>TCC (Graduação – Curso Superior de Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Instituto Federal de Educação da Paraíba / Unidade Acadêmica de Processos Industriais, 2023.</p> <p>Orientação : Prof^o. D.r Patric Lacouth da Silva.</p> <p>1. Identificação por radiofrequência. 2. Antenas planares. 3. Casamento de impedâncias. 4. Simulação eletromagnética. 5. Etiqueta RFID. I. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU 621.396(043)</p>
------	---

ANA BEATRIZ DE SOUZA NOGUEIRA RODRIGUES DE OLIVEIRA

ESTUDO PARAMÉTRICO E ANÁLISE DE IMPEDÂNCIA DE UMA ETIQUETA RFID UHF PASSIVA

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal da Paraíba, como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Engenharia Eletricista.

BANCA EXAMINADORA



Documento assinado digitalmente
PATRIC LACOUTH DA SILVA
Data: 10/08/2023 16:05:00-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. Patric Lacouth da Silva – IFPB
Orientador



Documento assinado digitalmente
ALFREDO GOMES NETO
Data: 10/08/2023 18:41:18-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. Alfredo Gomes Neto – IFPB
Membro da Banca

Prof. Dr. Erik Farias da Silva – IFPB
Membro da Banca

João Pessoa, 01 de agosto de 2023.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me concedido oportunidade de ingressar na Instituição, e por ter me abençoado com perseverança para poder construir meus objetivos durante o curso.

Agradeço aos meus pais Raquel e Alexandre e aos meus irmãos Ana Sofia e João Rafael, por terem me apoiado em momentos difíceis, por todo o amor e incentivo, e por me fazer entender que os estudos e trabalho abrirão portas para meu sucesso e felicidade.

Sou grata pelos professores que tive durante todos esses anos no IF, que dedicam a vida na construção do aprendizado e compartilhamento do saber com nós alunos. Dentre eles, gostaria de destacar Alfredo, Lincoln, Kalina e Juarez, Patric, Romeu e Jefferson. Além de maravilhosos profissionais, são pessoas inspiradoras! Agradeço em especial ao meu orientador, Patric, por ter aceitado meu convite e por sua dedicação e constante apoio ao longo destes meses para que este trabalho fosse realizado.

Agradeço aos meus amigos de turma: Artur, Allan, Andressa e Calebe, Bianca, Jessly e Victor. Que me apoiaram e dedicaram tempo para me ajudar durante toda esta caminhada, oferecendo suporte e ajuda em questões acadêmicas e pessoais. Nosso dia a dia marcaram uma era na minha vida.

Por último, mas não menos importante, agradeço a Artur Kramer, meu amor trazido através do curso de Engenharia Elétrica. Obrigada por todo apoio, incentivo e inspiração que me ofereceu. Por todas as madrugadas em claro estudando, horas no Discord resolvendo listas de exercícios e estresses em trabalho em grupo rs. Trilhar toda essa jornada ao seu lado foi, sem dúvidas, muito mais fácil, leve e feliz!

RESUMO

A tecnologia de Identificação por Radiofrequência (RFID) está se tornando cada vez mais fundamental na rotina das pessoas, nas aplicações como: transações financeiras, automação industrial, rastreamento e gerenciamento de logística. Um dos principais parâmetros para o desempenho desse tipo de sistema é o casamento de impedância entre os componentes, que são a antena e o *chip* da etiqueta. Assim, o presente trabalho de conclusão de curso tem como objetivo analisar o comportamento da impedância de uma antena UHF produzida e comercializada pela empresa NXP Semiconductors utilizada em uma etiqueta RFID. A princípio foram feitas alterações nas escalas da antena, utilizando o *software* de simulação eletromagnética Ansys HFSS ® para coletar os resultados gerados a partir dessas alterações. Posteriormente foi desenvolvido um programa em linguagem Python para analisar o comportamento das impedâncias e compará-los com os resultados do relatório disponibilizado pela empresa NXP.

Palavras-chave: Identificação por radiofrequência, casamento de impedâncias, antenas planares, simulação eletromagnética.

ABSTRACT

Radio Frequency Identification (RFID) technology is becoming increasingly fundamental in people's routines and applications, such as financial transactions, industrial automation, tracking, and logistics management. One of the main parameters for the high performance of this type of system is the impedance matching between the components, which are the antenna and the tag chip. With that in mind, this work aims to analyze the impedance behavior of a UHF antenna produced and marketed by NXP Semiconductors used in an RFID tag. At first, changes were made to the antenna scales, using the Ansys HFSS electromagnetic simulation software to collect the results generated from these changes. Later, Python was used to analyze the behavior of the impedances and comparison with the results of the report provided by the company NXP.

Keywords: *Radio Frequency Identification, impedance matching, planar antennas, electromagnetic simulation*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de antenas de microfita patch (retangular e circular)	10
Figura 2 – Coordenadas utilizadas na análise da radiação de uma antena	12
Figura 3 – Regiões de campo de uma antena	13
Figura 4 – Polarização linear, polarização circular e polarização elíptica	14
Figura 5 – Sistema RFID	16
Figura 6 – Etiqueta RFID	17
Figura 7 – Exemplos de encapsulamento	18
Figura 8 – Simulação com base do tutorial da Ansys	19
Figura 9 – Resultado de impedância obtido (Z real)	20
Figura 10 – Resultado de impedância obtido (Z imaginário)	20
Figura 11 – Geometria de uma antena com formato de meandros	21
Figura 12 – Exemplos de antenas com formatos de meandros	21
Figura 13 – Desenho da antena no HFSS	22
Figura 14 – Duplicação do desenho da antena	22
Figura 15 – Subtração e interseção de cada antena	23
Figura 16 – Resultado da subtração e interseção de cada antena	23
Figura 17 – Alteração da escala no eixo Y	24
Figura 18 – Alteração da escala no eixo X	24
Figura 19 – Movimentação dos meandros para o loop	25
Figura 20 – União das duas partes	25
Figura 21 – Obtenção dos resultados	26
Figura 22 – Comparação entre resultados obtidos (HFSS x relatório da NXP)	27
Figura 23 – Comparação entre resultados obtidos (HFSS x relatório da NXP)	27
Figura 24 – Análise da parte real da impedância com variação na escala do eixo Y	29
Figura 25 – Análise da parte imaginária da impedância com variação na escala do eixo Y	29
Figura 26 – Análise da parte real da impedância com variação na escala do eixo X	30
Figura 27 – Análise da parte imaginária da impedância com variação na escala do eixo X	30
Figura 28 – Variação da parte real da impedância x Variação do eixo Y	31
Figura 29 – Variação da parte imaginária da impedância x Variação do eixo Y	32

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Frequência para sistemas RFID em diferentes localidades	17
Tabela 2 – Variação paramétrica em 915 MHz	31

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	10
2.1	Antenas Planares	10
2.2	Parâmetros Fundamentais das Antenas	11
2.2.1	Padrão de Radiação	11
2.2.2	Regiões de Campo	12
2.2.3	Diretividade	13
2.2.4	Ganho	13
2.2.5	Largura de banda	13
2.2.6	Polarização	13
2.2.7	Impedância	14
2.3	Propagação de Ondas UHF	15
2.3.1	Transmissão em Espaço Livre	15
2.3.2	Absorção	15
2.3.3	Reflexão	15
2.3.4	Difração e Refração	15
2.4	Sistemas RFID - Identificação por Radiofrequência	15
2.4.1	Etiqueta RFID	17
3	MATERIAIS E MÉTODOS	19
3.1	Ansys HFSS	19
3.2	Estudo e Análise da Antena RFID Escolhida	20
3.2.1	Processo de simulação da Antena RFID Escolhida	21
3.3	Python e Google Colab	26
4	RESULTADOS	27
4.1	Resultados obtidos com variação da escala no eixo Y	29
4.2	Resultados obtidos com variação da escala no eixo X	30
4.3	Análise da impedância para frequência de 915 MHz	31
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	33
	REFERÊNCIAS	34

1 INTRODUÇÃO

O RFID (*Radio Frequency Identification* ou Identificação por Radiofrequência, em português) é uma tecnologia sem fio capaz de realizar a identificação e rastreamento de forma automática através de sinais de rádio, sem necessidade de contato visual ou físico. O contexto que justifica a utilidade e necessidade do RFID é a demanda de se obter dados de elementos dinâmicos ou inseridos em um ambiente adverso visando o monitoramento, controle, análise e até a tomada de decisão estratégica baseada nesses dados.

As primeiras aplicações de identificação por radiofrequência remontam a década de 40, durante a Segunda Guerra Mundial, aquela época sendo utilizado para distinguir se os aviões que se aproximavam era amigos ou inimigos. Apesar disso, o primeiro aparelho que se utilizava de tecnologia RFID só foi patenteado na década de 70. Já na década de 80, houve a expansão de estudos voltados para o RFID (ROBERTI, 2005).

O RFID possui inúmeras aplicações que estão intrínsecas à rotina da sociedade como um todo, tais como: transações financeiras, prevenção de falsificações, saúde, automação industrial, rastreamento, gerenciamento de estoque e logística, automação residencial, internet das coisas dentre outros setores promissores (SILVEIRA, 2013). É assim inegável o impacto positivo desse tipo de sistema para a modernização e otimização de processos em diferentes campos de aplicação.

Para que um sistema RFID tenha bom desempenho, um dos principais parâmetros a ser analisado é a impedância dos componentes presentes na etiqueta. Esta é uma medida da resistência ao fluxo de corrente alternada em um circuito elétrico. Quando a impedância da antena coincide com a do chip RFID, a transferência de energia entre eles é otimizada, resultando em uma melhor comunicação entre a etiqueta e o leitor. É de responsabilidade da antena transmitir e receber sinais de radiofrequência entre a etiqueta e o leitor RFID (SILVA, 2019). Para que isso ocorra de forma eficiente, a antena da etiqueta e o chip RFID devem ter impedâncias compatíveis, procedimento denominado como casamento de impedâncias. Este fator é de extrema importância para o desempenho eficaz do sistema.

Para viabilizar o casamento de impedâncias entre a antena da etiqueta e o chip RFID, é necessário levar em consideração diversos fatores, como a geometria da antena, a frequência de operação do sistema RFID, os materiais utilizados na confecção da antena e do *chip*, entre outros.

Este trabalho tem como objetivo principal analisar a antena presente na etiqueta que é comercializada pela empresa *NXP Semiconductors*, comparando a análise realizada com o relatório técnico disponibilizado pela fabricante, a fim de identificar possíveis melhorias que resultem em um casamento de impedância mais otimizado.

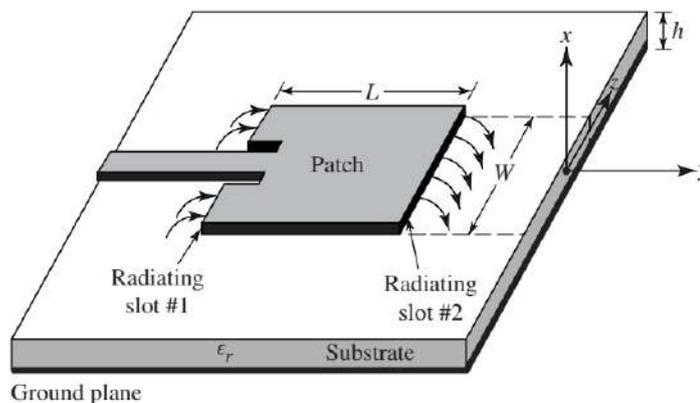
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Antenas Planares

Desde sua criação, até a atualidade, as antenas desempenham um papel fundamental na transmissão de informações, sendo uma parte indispensável da revolução das comunicações no último século. Por definição, antenas são dispositivos utilizados para radiar ou receber ondas eletromagnéticas, atuando como um tipo de interface entre uma linha de transmissão e o espaço livre (BALANIS, 2016).

A antena do tipo planar ou de microfita teve sua concepção em torno de 1950, através de estudos que tinham intuito de criar Circuitos Integrados Monolíticos de Micro-ondas (DESCHAMPS, 1953). Somente em 1970 esse tipo de antena começou a ser efetivamente explorado, principalmente para aplicações aeroespaciais. A estrutura de uma antena de microfita, consiste em duas placas paralelas, sendo uma delas o elemento irradiante (que pode assumir diversas formas e arranjos) e a outra o plano terra. Essas duas placas são separadas por um material dielétrico, denominado substrato. Essa estrutura pode ser vista na Figura 1:

Figura 1 – Exemplo de antenas de microfita patch (retangular e circular)



Fonte: (BALANIS, 2016).

O elemento irradiante das antenas de microfita é composto por um material metálico condutor ou supercondutor. Uma das características desse componente, é que sua espessura deve ser muito menor que o comprimento de onda da antena na frequência de ressonância no espaço livre. A sua geometria influencia na distribuição de corrente e no perfil do campo gerado na superfície da antena. O plano terra, da mesma forma que o elemento irradiante, também é composto por um material metálico e encontra-se na superfície inferior do substrato da antena. O plano terra, além da função de “aterramento”, tem a finalidade de impedir que a propagação das ondas eletromagnéticas ocorram em

direções não planejadas. O substrato, elemento presente entre o elemento irradiante e o plano terra, é composto por um material dielétrico.

A princípio, as antenas do tipo planar ou de microfita foram desenvolvidas para aplicações de sistemas de comunicações móveis e aeroespaciais voltados para o uso militar, que necessitavam de antenas que tenham estrutura discreta e pequena. Com o passar dos anos, esse tipo de antena passou a ser utilizada no setor comercial por causa das suas características, como: pequeno volume, baixo custo, formato flexível, variedade de configurações e compatibilidade com circuitos integrados.

Quando comparada aos demais tipos de antenas, as de microfita apresentam vantagens, como: grande faixa de frequência de operação (aproximadamente 100 MHz até 100 GHz), permite diferentes tipos de polarizações, além das vantagens físicas descritas anteriormente. Por outro lado, podem também apresentar desvantagens, como um baixo ganho.

2.2 Parâmetros Fundamentais das Antenas

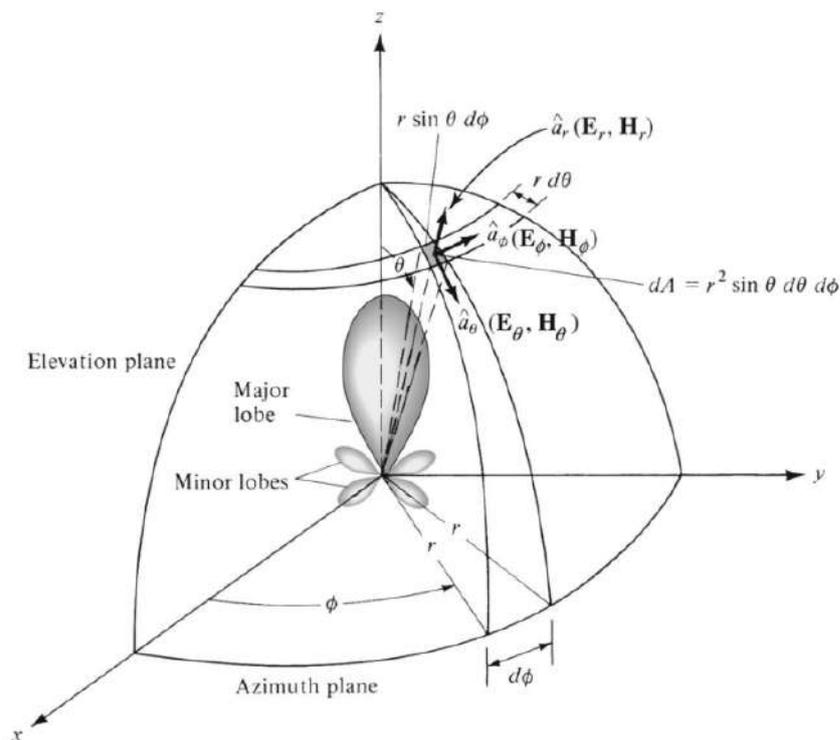
Tendo em vista que o desempenho e funcionamento de uma antena é analisado e definido com base em alguns parâmetros fundamentais, que nesta seção serão definidos e descritos com base na padronização IEEE Std 145-1993 do Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE... , 1993).

2.2.1 Padrão de Radiação

Em termos bibliográficos, o padrão de radiação de uma antena é descrito como: "uma função matemática ou uma representação gráfica das propriedades de radiação da antenas em função das coordenadas espaciais (X , Y e Z)" (BALANIS, 2016). O sinal de saída de uma antena é caracterizado pelo padrão de radiação, que é uma distribuição da potência radiada em função da sua direção no espaço.

Na Figura 2, que ilustra o padrão de radiação de uma antena, é possível observar que mesmo que o padrão seja tridimensional, muitas vezes apenas cortes planos são analisados. Os padrões do plano E e do plano H são as duas visualizações mais relevantes durante a análise. O plano E mostra a vista do padrão de radiação obtido a partir de uma seção contendo o valor máximo do campo radiado e na qual o campo elétrico se situa no plano da vista seccional escolhida. Já o plano H, mostra a vista do padrão no qual o campo H está no plano da seção, e esta seção é escolhida para conter a direção máxima da radiação.

Dentre os tipos de padrão de radiação, podem ser destacados os seguintes: isotrópico, direcional e omnidirecional. O padrão isotrópico é definido como um padrão de radiação ideal, sem perdas e com radiação igual em todas as direções, porém esse padrão

Figura 2 – Coordenadas utilizadas na análise da radiação de uma antena

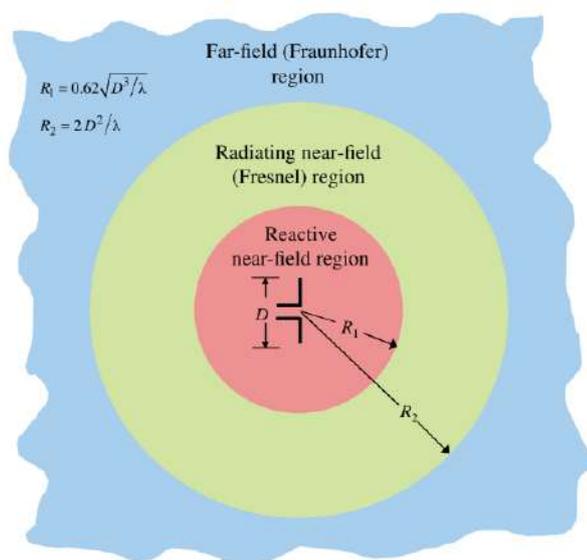
Fonte: (BALANIS, 2016).

é fisicamente irreal. O padrão direcional tem a característica de radiar ou receber ondas eletromagnéticas de forma mais eficaz em algumas direções específicas. Já o padrão omnidirecional é definido quando a radiação ocorre em todas as direções perpendiculares a um eixo, sendo não direcional em um determinado plano e direcional em qualquer outro plano ortogonal.

2.2.2 Regiões de Campo

O espaço ao redor de uma antena é dividido em três principais regiões, a fim de identificar a estrutura de campo em cada uma. A Figura 3 ilustra a divisão dessas três regiões, são elas: região de campos próximos reativos (destacada em vermelho), região de campos próximos radiante ou região de Fresnell (destacada em verde) e região de campos distantes ou região de Fraunhofer (destacado em azul).

A região de campos próximos reativos da antena é definida como a região imediatamente em torno da antena onde predomina o campo reativo, nesta região os campos elétrico e magnético da onda não são ortogonais, dessa forma não é possível avaliar as propriedades de radiação da antena. A região de Fresnell está localizada entre a região de campos próximos reativos e a região de campos distantes. Na região de Fraunhofer a potência irradiada pela antena decai e os campos elétrico e magnético são ortogonais, podendo ser determinadas as propriedades de radiação da antena (BALANIS, 2016).

Figura 3 – Regiões de campo de uma antena

Fonte: (BALANIS, 2016).

2.2.3 Diretividade

A diretividade é a proporção da intensidade de radiação em uma determinada direção da antena para a intensidade de radiação média em todas as direções. Ela define sua capacidade de concentrar a energia numa determinada direção (BALANIS, 2016).

2.2.4 Ganho

Um dos principais parâmetros a ser analisado no desempenho de uma antena é o ganho, que está relacionado a eficiência e também a diretividade da antena. Por definição, o ganho é a relação entre a intensidade de radiação em uma determinada direção, e a intensidade obtida caso a potência recebida pela antena fosse irradiada de forma isotrópica (BALANIS, 2016).

2.2.5 Largura de banda

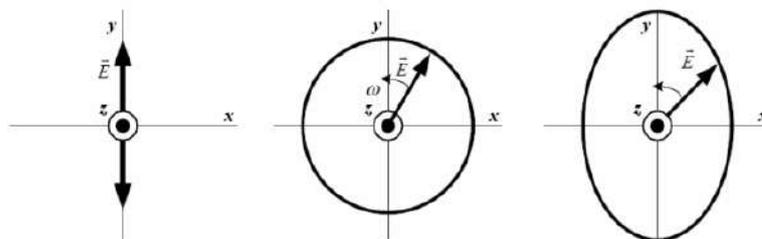
A largura de banda de uma antena é o intervalo de frequência, de uma frequência mínima até uma frequência máxima, onde o desempenho da antena está em conformidade com um padrão esperado. As especificações de largura de banda de cada antena são definidas para atender às necessidades de acordo com a aplicação (BALANIS, 2016).

2.2.6 Polarização

A polarização é dada em função da orientação do vetor campo elétrico na direção máxima de radiação, ou seja, na direção do condutor da antena. Existem três categorias quando fala-se de polarização, são elas: linear, circular e elíptica (ver Figura 4). Esses

tipos estão relacionados com o comportamento desempenhado pelos vetores de campo elétrico à direção da propagação.

Figura 4 – Polarização linear, polarização circular e polarização elíptica



Fonte: (NXP, 2008).

A polarização linear ocorre quando o vetor que descreve o campo elétrico em função do tempo se mantém em uma mesma direção. A polarização circular é produzida quando ocorre a polarização de dois campos (um linear e outro perpendicular) com a diferença de 90° . Já na polarização a figura traçada pelo vetor campo elétrico é uma elipse.

2.2.7 Impedância

Por definição, a impedância é a grandeza presente no elemento do circuito que define a oposição que ele tem à passagem de corrente elétrica alternada. Em um circuito de antena, é importante que ocorra o casamento de impedâncias, que é a combinação entre a impedância de entrada da antena e a impedância da fonte ou alimentação (RIOS; PERRI, 2002). Quando isso ocorre, a potência máxima da fonte é entregue para a antena e conseqüentemente esta fornece potência máxima ao meio de propagação. Entretanto, quando este fenômeno não ocorre, parte da energia fornecida para a antena é refletida, gerando aparecimento de ondas indesejadas na linha de transmissão e conseqüentemente perda de potência.

Em projetos de dimensionamento de antenas, a impedância de entrada é um parâmetro de extrema importância, pois influencia diretamente na eficiência e no comportamento das antenas como um elemento do circuito. Dessa forma, de modo a garantir a máxima transferência de potência, faz-se necessário que haja o casamento da impedância de entrada da antena com a impedância da fonte, que nos casos de aplicações RFID trata-se da impedância do *chip* ou Circuito Integrado. A fim de que haja tal casamento, a impedância de entrada da antena deve ser igual ao conjugado complexo da impedância do *chip*.

2.3 Propagação de Ondas UHF

2.3.1 Transmissão em Espaço Livre

O modelo de propagação de ondas no espaço livre consiste em uma antena transmissora, o caminho que as ondas vão percorrer e uma antena receptora. Nesse modelo, o transmissor e o receptor estão localizados em um espaço sem qualquer obstrução, onde o campo pode ser calculado em um ponto qualquer de observação e os parâmetros de cada componente determinam a funcionalidade do sistema.

2.3.2 Absorção

O fenômeno da absorção ocorre quando o meio capta parte da energia da onda, com isso o valor absoluto da intensidade de campo diminui ao longo do caminho da propagação, gerando diminuição da amplitude e distância alcançada. Muitos materiais dielétricos são substancialmente imunes à absorção.

2.3.3 Reflexão

A reflexão de uma onda acontecerá sempre que ela encontrar um obstáculo. Quando isso ocorre a onda incidente sofrerá a reflexão, conservando a energia do campo e dando origem a onda refletida. Existem dois tipos diferentes de reflexão: direcional (ocorre em superfícies planas) e difusa (ocorre em superfícies ásperas).

2.3.4 Difração e Refração

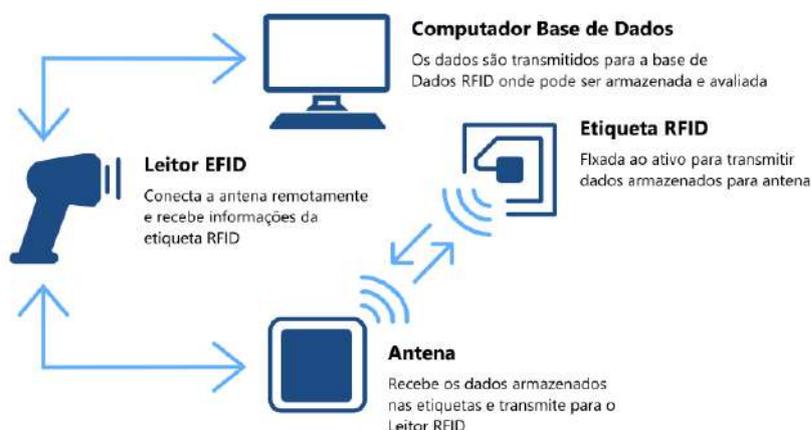
A difração é a curvatura de uma onda em torno de um objeto ou a propagação após a passagem de uma abertura. Ou seja, a capacidade das ondas de contornar objetos.

Quando uma onda passa de um meio de propagação para outro que tem uma velocidade de propagação diferente, ocorrerá uma mudança na direção da onda. Esta mudança de direção da onda ao entrar no segundo meio é chamada de refração.

2.4 Sistemas RFID - Identificação por Radiofrequência

RFID, sigla para *Radio Frequency Identification* (Identificação por Radiofrequência), é a tecnologia que utiliza a comunicação por radiofrequência para transmitir dados utilizando uma etiqueta e um leitor. As etiquetas RFID são elementos que possuem uma antena e um chip envolvidos por algum material, os quais respondem a sinais remotos de um leitor, que se trata de outra antena (SANTINI, 2008). A Figura 5 apresenta um modelo geral da utilização da tecnologia RFID, composta por uma etiqueta, uma antena como leitor da etiqueta e um computador para guardar os dados transmitidos.

Figura 5 – Sistema RFID



Fonte: (BORGES, 2023).

A tecnologia RFID, nasceu para fins militares durante as grandes guerras. O princípio dessa tecnologia está associada aos sistemas de detecção e telemetria por rádio, o RADAR (*Radio Detection and Ranging*). Porém, foi só em 1973 que a primeira patente de um sistema RFID foi registrada, tratava-se de um sistema ativo de RFID com memória regravável desenvolvido por Mario W. Cardullo. Nesse mesmo ano, nos Estados Unidos, o empreendedor Charles Walton recebeu a patente para um sistema passivo, utilizado para destravar portas sem ajuda de chaves.

Paralelamente, o governo norte-americano também trabalhava e desenvolvia sistemas de RFID. A princípio foram utilizados para rastreamento de material radioativo e rastreamento de gado (SANTINI, 2008). As etiquetas utilizadas eram de baixas frequências (LF) de 125 kHz, até que as empresas que comercializavam os elementos desse sistema mudaram para os de alta frequência (HF) 13,56 MHz de forma irregular.

Foi nos anos 1980 que a empresa IBM patenteou os sistemas de frequências ultra altas (UHF) possibilitando que os sistemas RFID fosse utilizado em distâncias superiores a dez metros. Nos dias atuais é utilizada a faixa de frequência de 860 MHz até 960 MHz para aplicações que utilizam RFID. Em (GS1, 2022) estão presentes as faixas de frequências permitidas por países ao redor do mundo. A tabela a seguir, apresenta alguns exemplos:

O grande crescimento da tecnologia de RFID ocorreu quando algumas empresas fundaram o Auto-ID Center, dentro do MIT (*Massachusetts Institute of Technology*). O objetivo desse centro de estudos era transformar o RFID de um pequeno banco de dados para número de série, resultando em diminuição de custos e transformando o RFID em uma tecnologia de rede, conectando objetos na internet através das etiquetas.

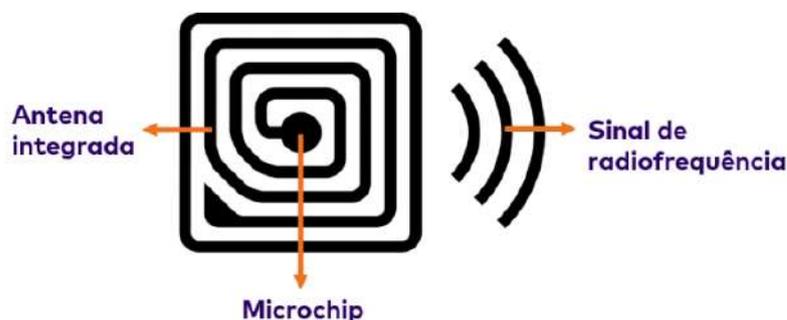
Tabela 1 – Frequência para sistemas RFID em diferentes localidades

Região	Banda de Frequência RFID
Global Band	860-960 MHz
ETSI/EU European Telecommunications Standards Institute	865-868 MHz 915-921 MHz
China	840-845 MHz 920-925 MHz
FCC/US Federal Communications Commission	902-928 MHz
Japan Australia	915-928 MHz 920-926 MHz
Brasil	902-907.5 MHz 915-928 MHz
Rest of the world	ETSI/FCC

Fonte: (LUBNA et al., 2023).

2.4.1 Etiqueta RFID

A etiqueta RFID basicamente é composta pelo encapsulamento de uma antena e um chip (ver exemplo na Figura 6). As etiquetas podem ser divididas entre passivas e ativas. As etiquetas passivas não possuem alimentação e a própria antena converte a energia das ondas eletromagnéticas em energia elétrica para ativação do chip. Já as etiquetas ativas possuem alimentação por meio de baterias embutidas em sua estrutura. No caso de etiquetas RFID, para melhor desempenho do sistema, é necessário que o casamento de impedâncias ocorra entre a antena da etiqueta e o chip.

Figura 6 – Etiqueta RFID

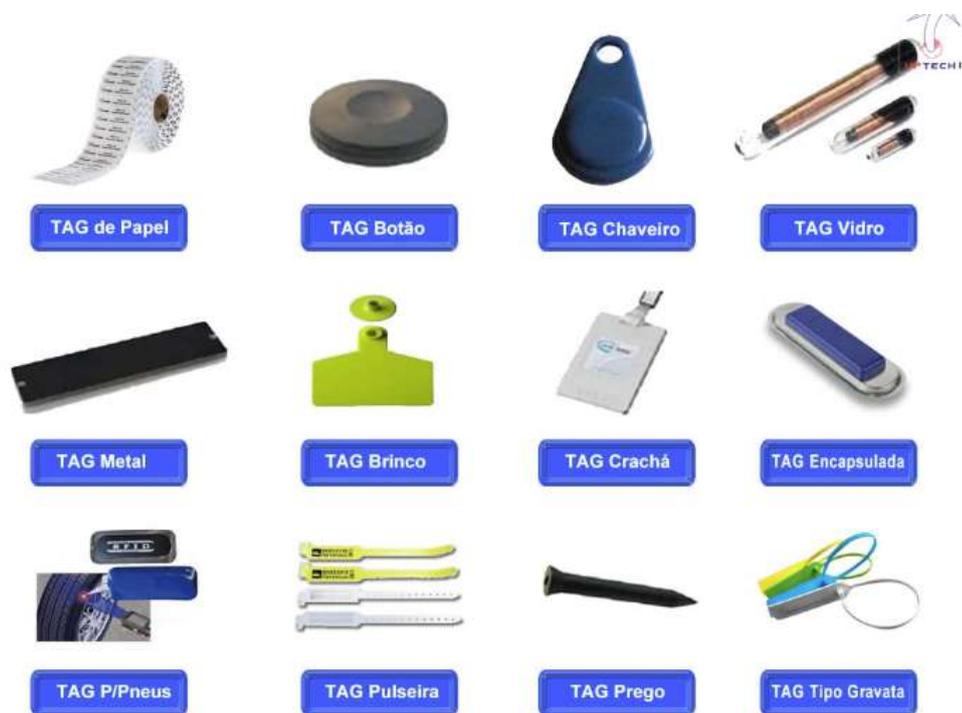
Fonte: (COUTO; MALAFAIA, 2019).

A função da antena é transformar a energia eletromagnética guiada pela linha de transmissão em energia eletromagnética irradiada e vice-versa. O tamanho da antena é definido a partir da faixa de frequência de operação e comprimento de onda desejado. O

chip da etiqueta, formado por diversos micro componentes, é responsável por decodificar o sinal de entrada, modulá-lo de uma forma que caracterize a unicidade da etiqueta e encaminhar esse sinal à antena, além de armazenar as informações (GUEDES, 2017).

As etiquetas são comercializadas para diversos tipos de aplicações. Existem etiquetas aplicadas às mais diversas situações, como altas e baixíssimas temperaturas, locais com altas pressões e aplicações onde ocorram quedas e colisões. Para isso, é extremamente importante planejar o tamanho, material, modelo e resistência da etiqueta. A Figura 7 apresenta alguns tipos de encapsulamento.

Figura 7 – Exemplos de encapsulamento



Fonte: (COUTO; MALAFAIA, 2019).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão descritas as ferramentas e os processos realizados para que a pesquisa fosse desenvolvida.

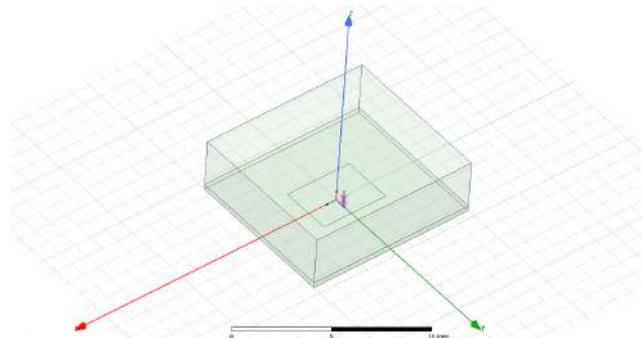
3.1 Ansys HFSS

O HFSS (*High-Frequency Structure Simulator*) é um *software* de simulação eletromagnética 3D multifuncional produzido pela Ansys [®], empresa desenvolvedora de softwares para simulação computacional. O HFSS oferece tecnologias para simulações de projetos de alta frequência, como antenas, circuitos de radiofrequência ou micro-ondas, sistemas de radar, satélites, entre outros componentes digitais (FILHO, 2021). Através do HFSS também é possível simular problemas como perdas devido à atenuação, acoplamento, radiação e reflexão.

Para o desenvolvimento e cálculo das estruturas eletromagnéticas, o HFSS utiliza o método de elementos finitos, descrito em (SADIKU, 2004). Além disso, o *software* possui um processador de solução automatizado, onde o usuário especifica a geometria, realizando a construção com uma aparência semelhante ao *Computer Aided Design* (CAD), definindo as propriedades do material e a faixa de frequência de solução necessária.

Inicialmente, foi realizada a criação do projeto, simulação e análise de uma antena de microfita retangular (como a ilustrada na Figura 1), com cabo coaxial na alimentação e impedância de 50Ω , com base no tutorial *Getting Started with HFSS: Probe Feed Patch Antenna* disponibilizado pela Ansys em (ANSYS, 2013). Com a execução do tutorial, foi possível obter conhecimento na construção do desenho da antena (substrato, forma do elemento irradiante e plano terra), bem como nas próprias ferramentas disponíveis no HFSS. Na Figura 8 abaixo, pode ser observado a antena de microfita simulada:

Figura 8 – Simulação com base do tutorial da Ansys

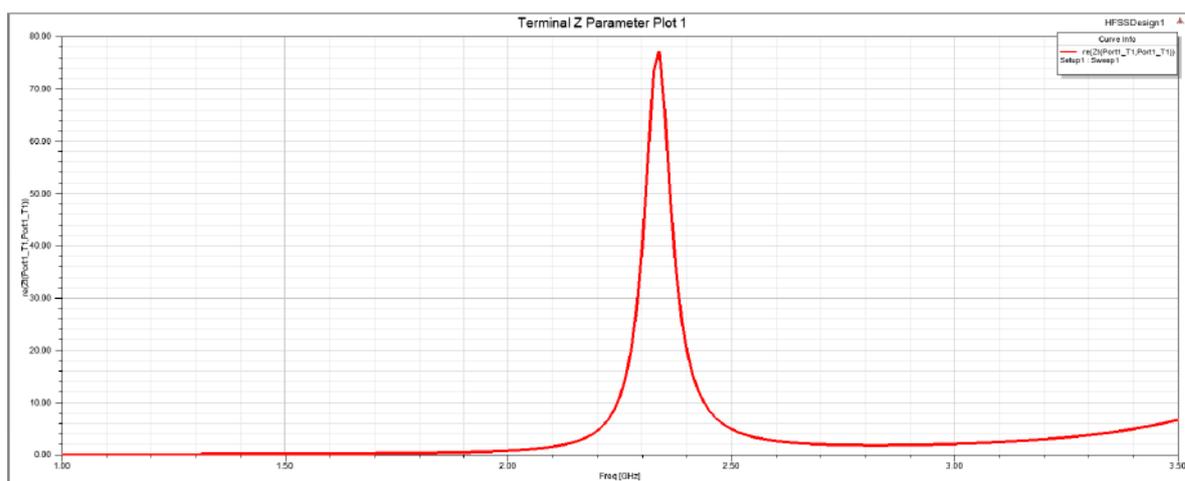


Fonte: Autoria própria.

Além da construção do desenho da antena, através da primeira simulação no HFSS,

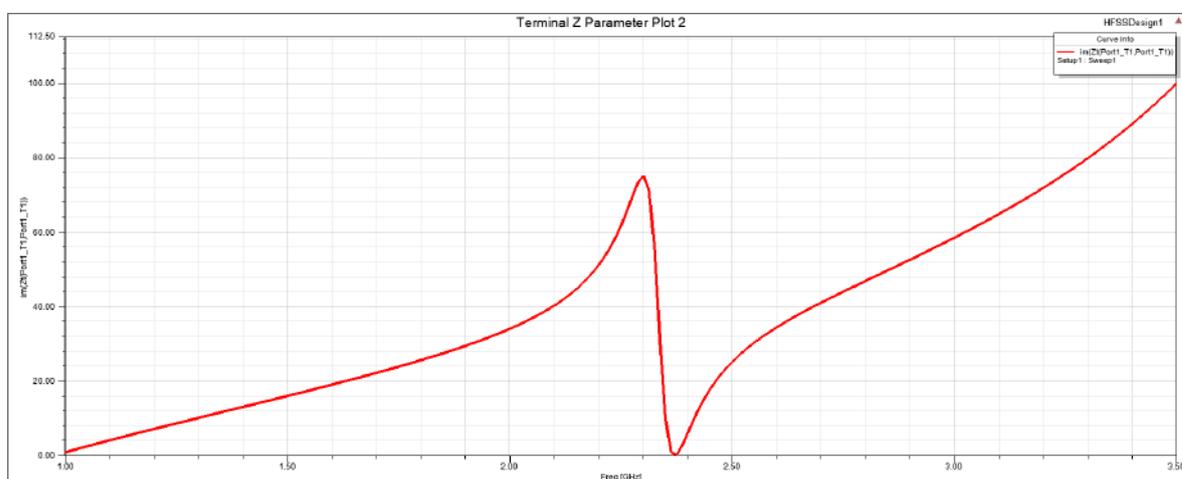
também foi possível gerar relatórios baseados nos parâmetros a serem analisados. Como o propósito desta pesquisa é obter os valores de impedância nas simulações, a fim de analisar o casamento de impedâncias entre a antena e o chip, foram gerados a partir da "simulação teste" os gráficos e valores de impedância referentes à antena de microfitas simulada (resultados presentes nas Figuras 9 e 10).

Figura 9 – Resultado de impedância obtido (Z real)



Fonte: Autoria própria.

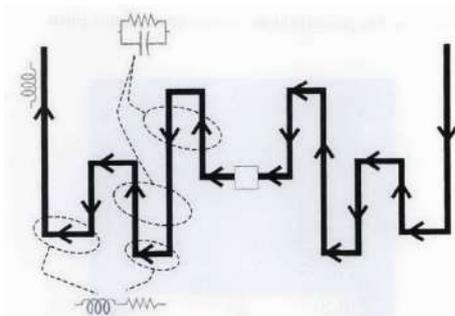
Figura 10 – Resultado de impedância obtido (Z imaginário)



Fonte: Autoria própria.

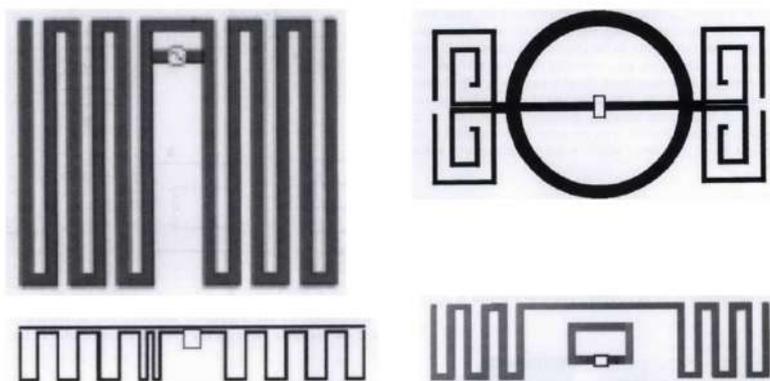
3.2 Estudo e Análise da Antena RFID Escolhida

Conforme descrito por (MARROCCO, 2003), ao "dobrar" uma antena dipolo no formato de meandros, surgem nessa nova configuração reatâncias indutivas e capacitivas que afetam a impedância da antena, como mostra a Figura 11.

Figura 11 – Geometria de uma antena com formato de meandros

Fonte: (MARROCCO, 2008).

Em antenas RFID essa técnica é principalmente utilizada para redução de tamanho físico, tendo em vista as diversas aplicações que podem ser utilizadas. Na Figura 12 estão ilustradas algumas antenas que dispõem desse tipo de configuração

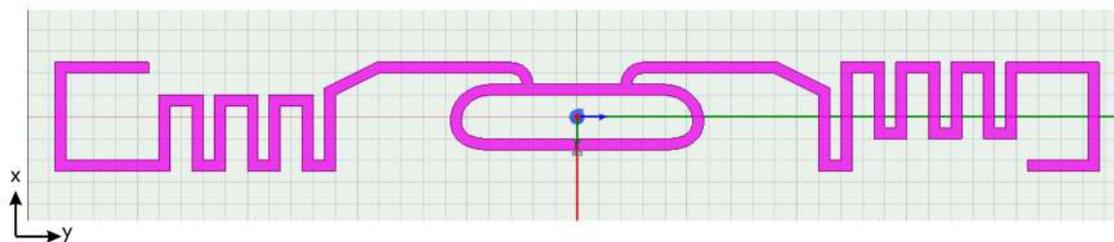
Figura 12 – Exemplos de antenas com formatos de meandros

Fonte: (MARROCCO, 2008).

Dentre as opções de antenas presentes no mercado, foi escolhida para análise a antena UHF RFID que está especificada em (NXP, 2008), fabricada pela NXP Semiconductors. Pois além da disponibilização das informações de dimensões, também existe disponível o modelo em CAD (mostrado na Figura 13).

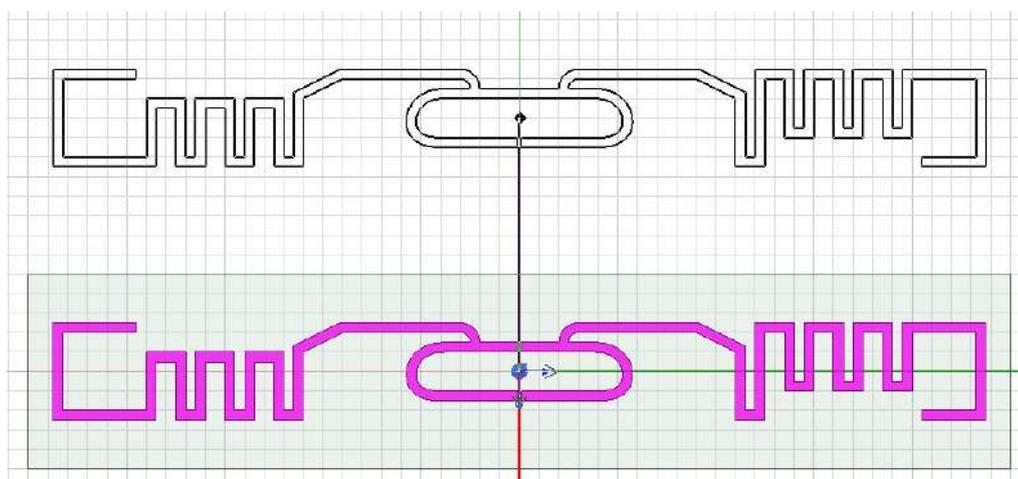
3.2.1 Processo de simulação da Antena RFID Escolhida

Determinada a antena a ser analisada na pesquisa, foi iniciado o processo de obtenção dos resultados. Para isso, foi necessário importar no HFSS o desenho da antena, disponibilizado pela NXP através do relatório (NXP, 2008). Após importar o desenho, foram feitas manipulações com a finalidade de alterar o formato da antena e após isso analisar o seu comportamento a cada alteração na faixa de frequência de 0,7 à 1,2 GHz. A Figura 13 ilustra o desenho original da antena, visto da perspectiva de topo.

Figura 13 – Desenho da antena no HFSS

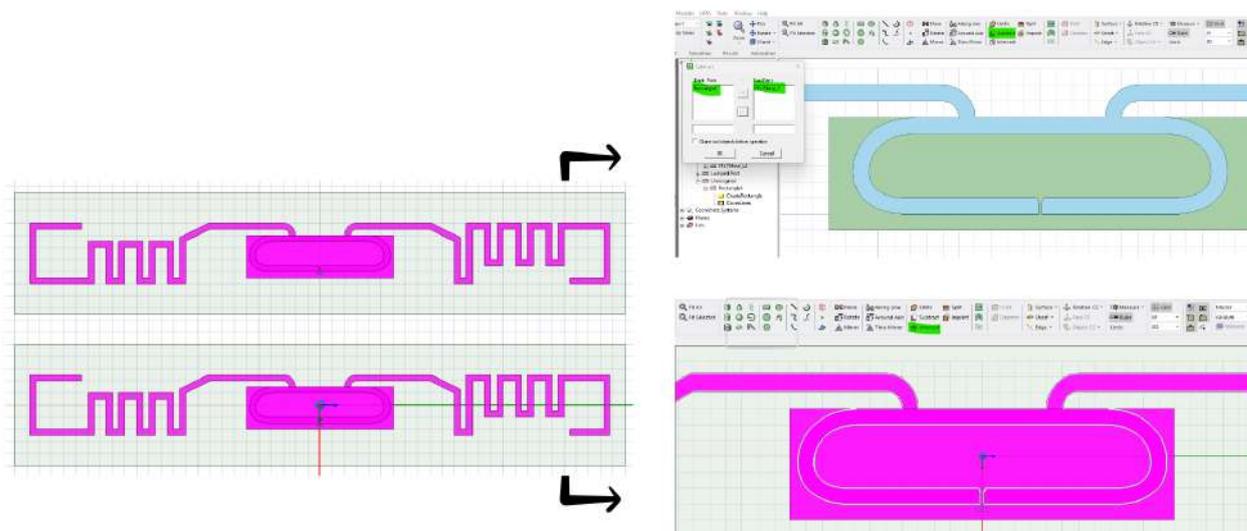
Fonte: Autoria própria.

Para uma primeira análise, neste trabalho serão necessárias apenas alterações nos braços da antena, ou seja, nas laterais (meandros), que é responsável, principalmente, pelo casamento da parte resistiva da impedância. Como o centro (*loop*) permanecerá intacto, foi necessário separar as duas partes, para que as alterações a serem realizadas não afetem a escala e forma do *loop*. Tendo isso em vista, o primeiro passo foi duplicar o desenho da antena, como mostrado na Figura 14.

Figura 14 – Duplicação do desenho da antena

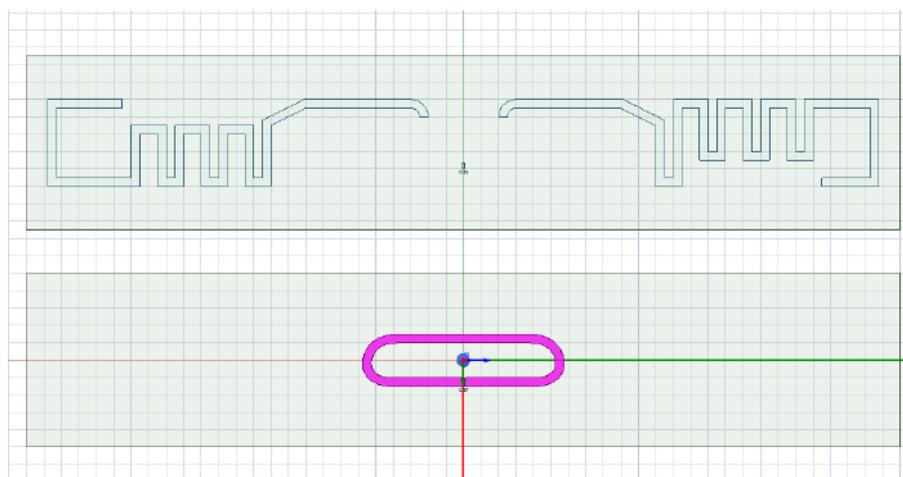
Fonte: Autoria própria.

Após duplicação do desenho da antena, foram inseridos dois retângulos (um em cada desenho), dessa forma seria possível separar os meandros do loop. Para obter somente os meandros, foi realizada a operação de subtração entre o retângulo e a antena presente na parte superior da Figura 15. Para obter somente o *loop*, foi realizada a operação de interseção entre o retângulo e a antena presente na parte inferior da Figura 15:

Figura 15 – Subtração e interseção de cada antena

Fonte: Autoria própria.

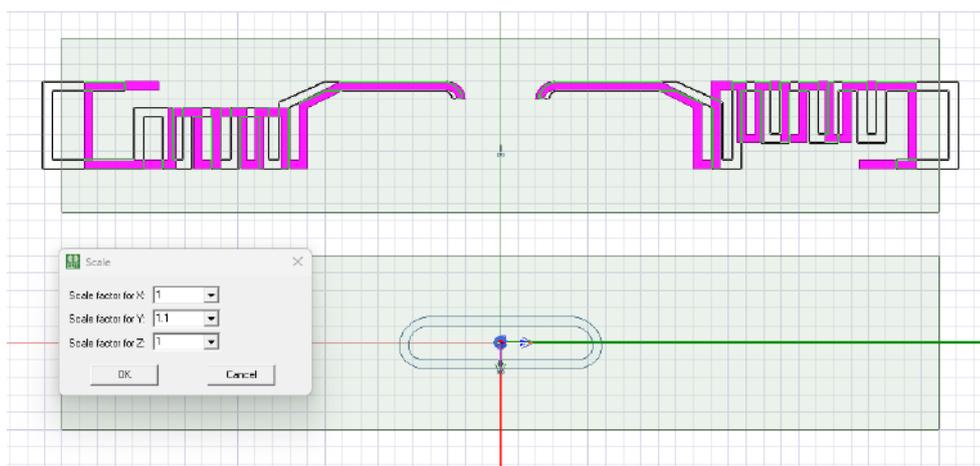
Realizada as operações descritas no parágrafo anterior, o resultado obtido foi o que está ilustrado na Figura 16, os meandros e o *loop* separados.

Figura 16 – Resultado da subtração e interseção de cada antena

Fonte: Autoria própria.

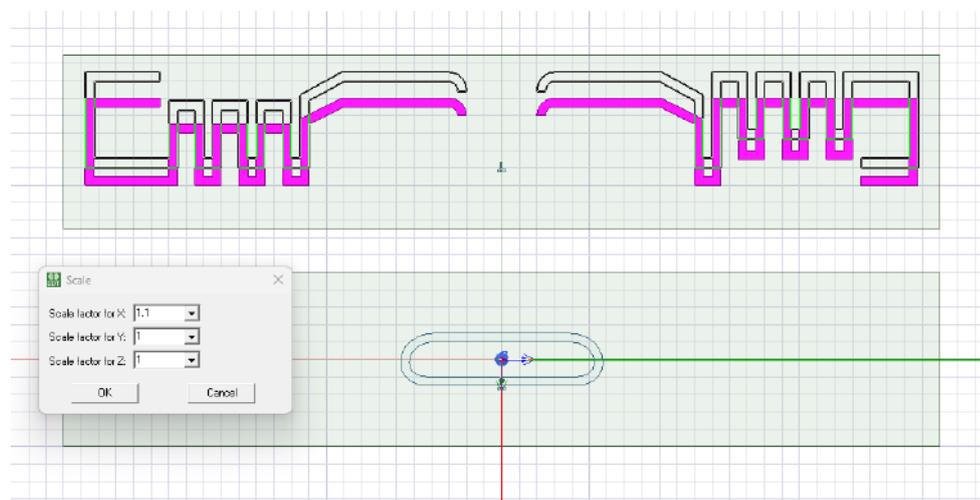
A partir desta etapa, foram realizadas de fato as alterações, que consistem em aumentar a escala tanto no eixo x quanto no eixo y, de forma separada. Ou seja, primeiramente aumentando no eixo y, sem modificar a escala no eixo x, e posteriormente aumentando a escala no eixo x, sem modificar a escala no eixo y. A escala foi alterada de 1 até 1,1, de 0,01 em 0,01, isto é, foi aumentada em 10% de 1% em 1%.

Na Figura 17, é possível observar os limites das alterações de escala no eixo y (horizontal). O formato em rosa mostra os meandros sem alterações na escala, enquanto o formato em linhas pretas mostra como ficarão as dimensões dos meandros após aumentar em 10%.

Figura 17 – Alteração da escala no eixo Y

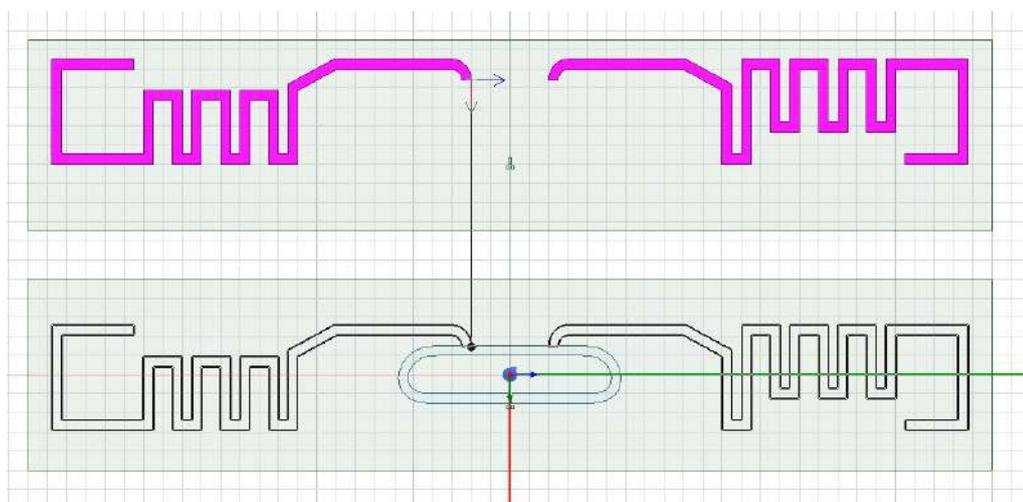
Fonte: Autoria própria.

Na Figura 18, é possível observar os limites das alterações de escala no eixo x (vertical). O formato em rosa mostra os meandros sem alterações na escala, enquanto o formato em linhas pretas mostra como ficarão as dimensões dos meandros após aumentar em 10%.

Figura 18 – Alteração da escala no eixo X

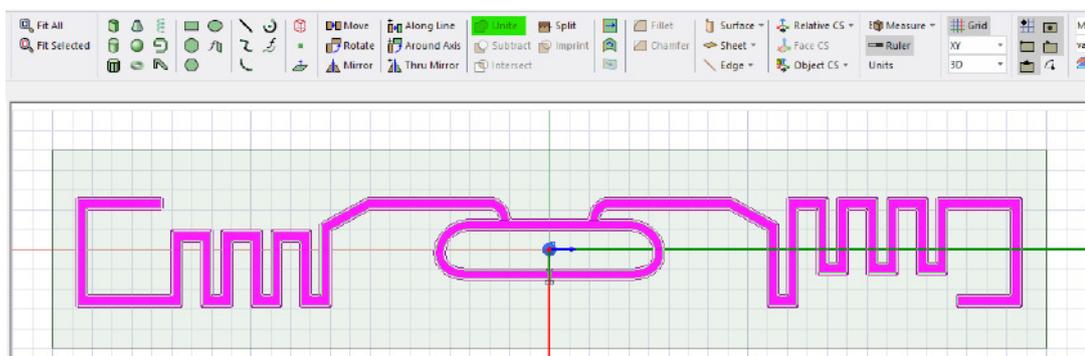
Fonte: Autoria própria.

Após realizar a alteração na escala, é necessário juntar as duas partes separadas anteriormente. Para isso, os meandros foram movidos para junto do *loop*, como mostrado na Figura 19.

Figura 19 – Movimentação dos meandros para o loop

Fonte: Autoria própria.

Para finalizar o processo de alteração, é necessário utilizar a ferramenta de união, destacada em verde na Figura 20 abaixo:

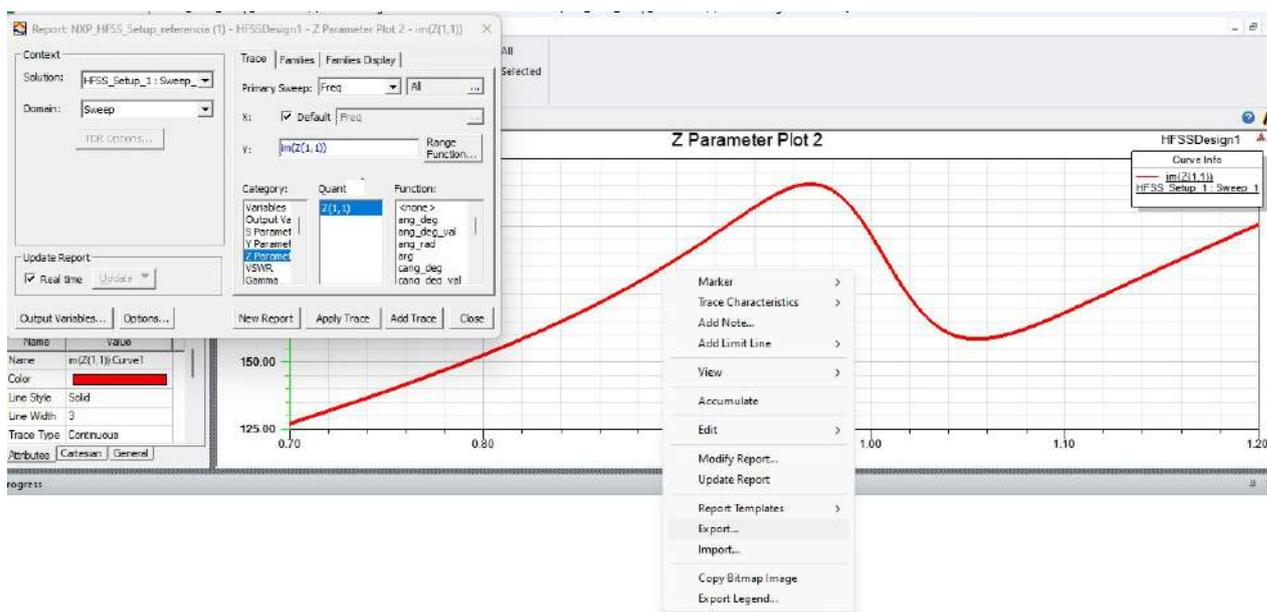
Figura 20 – União das duas partes

Fonte: Autoria própria.

Em seguida, a simulação foi realizada e os resultados das impedâncias (real e imaginária) foram obtidos. Com estes, foi possível exportar os pontos do gráfico em formato de Tabela, como mostra a Figura 21.

Todo o processo citado nesta subseção foi repetido vinte vezes, sendo dez para alterações no eixo y e dez para alterações no eixo x. Cada simulação gerou dois resultados, um da parte real e outro da parte imaginária da impedância.

Figura 21 – Obtenção dos resultados



Fonte: Autoria própria.

3.3 Python e Google Colab

Python é uma linguagem de programação de alto nível, conhecida por possuir sintaxe simples e fácil compreensão humana. Além disso, é a linguagem de programação com maior número de usuários no ramo da ciência e análise de dados e uma das mais utilizadas no mundo (NARANG, 2023).

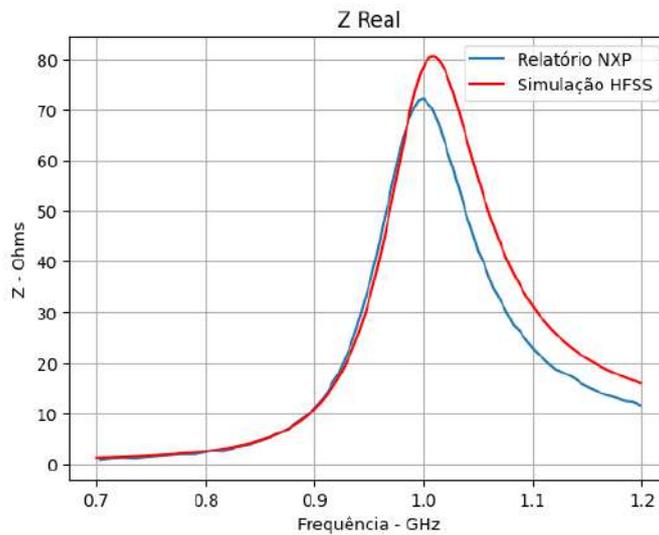
O Colab (*Colaboratory*) é um serviço de Jupyter Notebook oferecido pelo Google, que não necessita de configuração para uso e oferece ambiente para execução de código de forma colaborativa (GOOGLE, 2023). Neste trabalho, todos os códigos foram escritos e executados no Google Colab.

Após extrair os arquivos dos resultados obtidos no HFSS, foi utilizado Python (especificadamente as bibliotecas NumPy e Matplotlib) para ler os arquivos e realizar o tratamento dos dados, agrupando e armazenando as informações de frequência e impedância em matrizes.

4 RESULTADOS

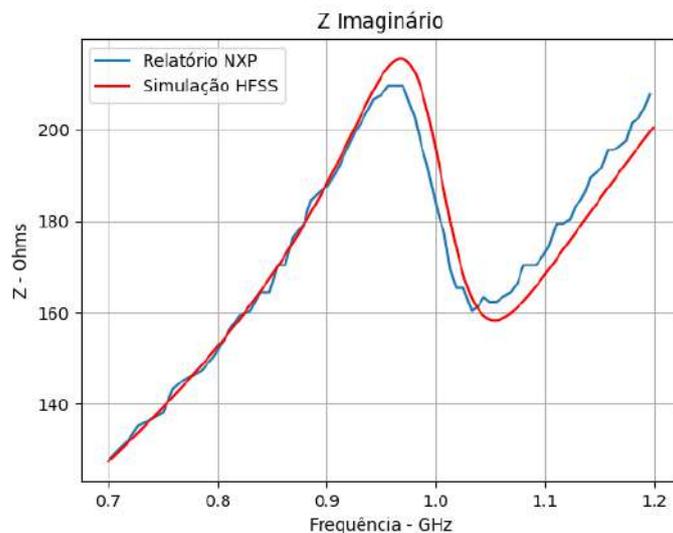
Foi realizada uma validação dos resultados adquiridos nessa pesquisa, as Figuras 22 e 23 mostram um comparativo da parte real e imaginária da impedância. Os resultados foram obtidos através do relatório da NXP (linha azul), e através da simulação da antena com as dimensões originais da antena (linha vermelha), que estão presentes em (NXP, 2008). Foi possível concluir através desse resultado que as simulações descritas na subseção 3.2.1 estão de fato coerentes, pois a impedância apresenta mesmo comportamento.

Figura 22 – Comparação entre resultados obtidos (HFSS x relatório da NXP)



Fonte: Autoria própria.

Figura 23 – Comparação entre resultados obtidos (HFSS x relatório da NXP)



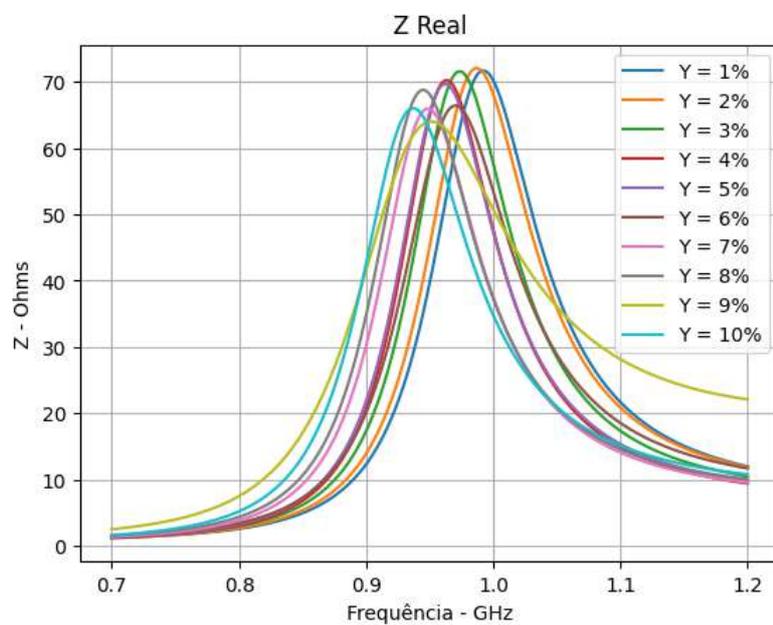
Fonte: Autoria própria.

A distinção entre os resultados ocorre devido a diferença de *softwares* utilizados para a simulação. Onde no relatório da NXP foi utilizado o CST Microwave Studio, e nessa pesquisa, foi utilizado o Ansys HFSS.

Após tratamento dos dados extraídos das simulações no HFSS, foram ilustrados os resultados adquiridos, através do gráfico da impedância em função da frequência. Pode-se observar que, apesar das alterações na escala terem sido realizadas de forma linear, as respostas a essas alterações não são lineares. Uma das causas desse comportamento é o próprio formato da antena, visto que nos "braços" da antena os meandros acabam funcionando como duas placas paralelas, gerando capacitância adicional ao circuito equivalente. Dessa forma, foi possível concluir que ao aumentar os braços da antena, ocorreram alterações que vão além da resistência.

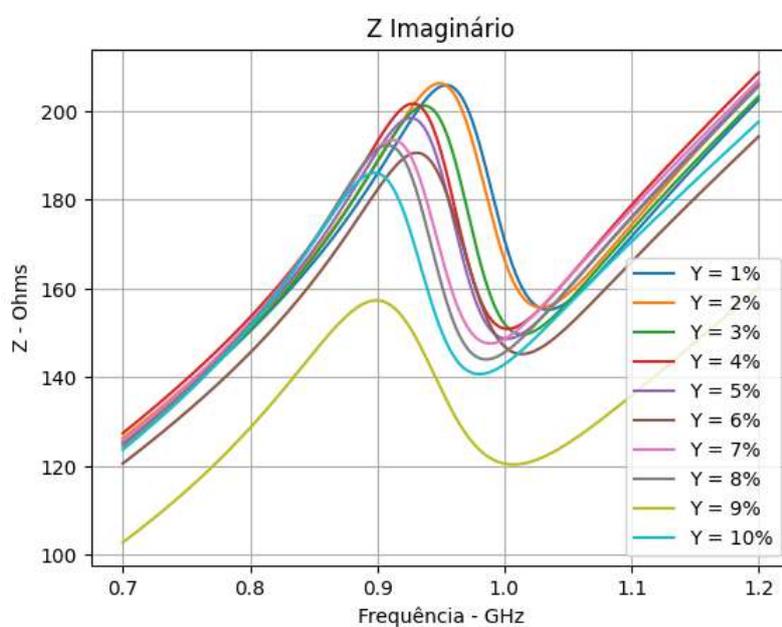
4.1 Resultados obtidos com variação da escala no eixo Y

Figura 24 – Análise da parte real da impedância com variação na escala do eixo Y



Fonte: Autoria própria.

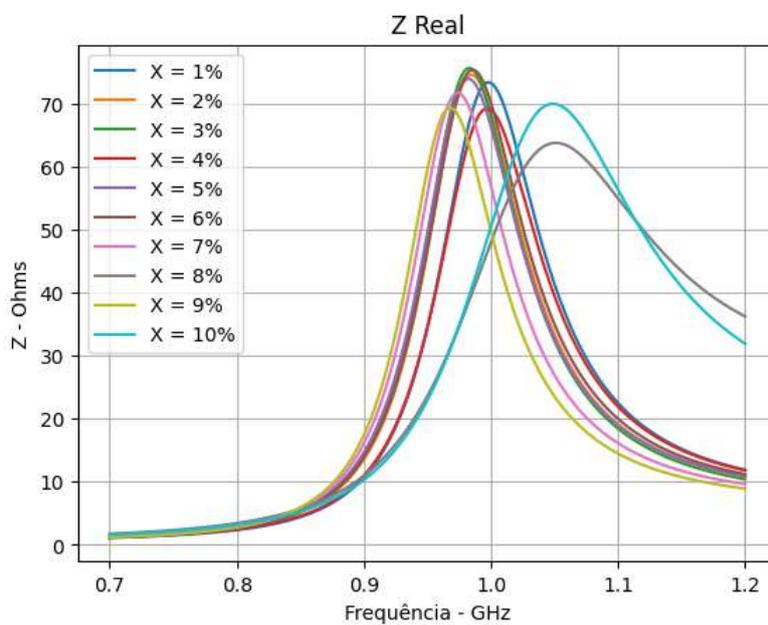
Figura 25 – Análise da parte imaginária da impedância com variação na escala do eixo Y



Fonte: Autoria própria.

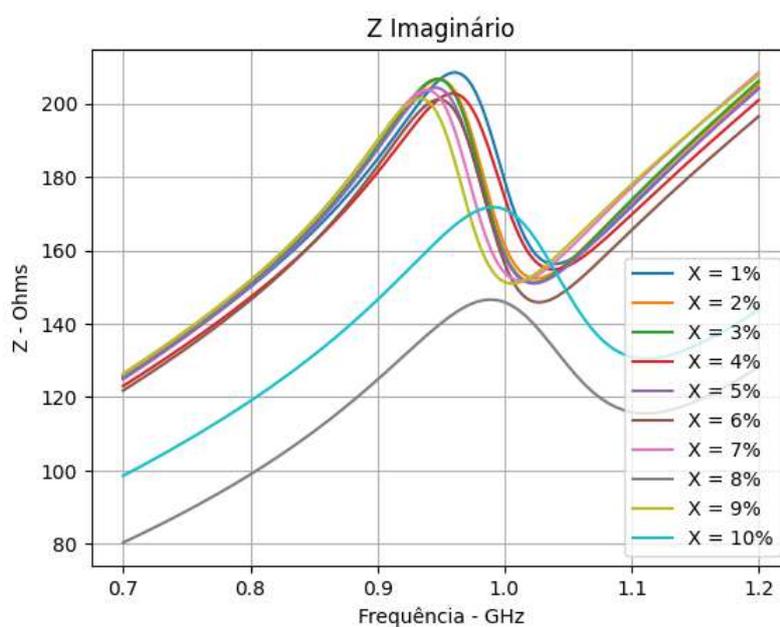
4.2 Resultados obtidos com variação da escala no eixo X

Figura 26 – Análise da parte real da impedância com variação na escala do eixo X



Fonte: Autoria própria.

Figura 27 – Análise da parte imaginária da impedância com variação na escala do eixo X



Fonte: Autoria própria.

4.3 Análise da impedância para frequência de 915 MHz

Foi realizada a análise do comportamento da impedância para alterações nas escalas y e x especificadamente na frequência de 915 MHz, que é a frequência utilizada no Brasil. Foram agrupados em uma tabela, os dados referentes a parte real e imaginária da impedância, de acordo com cada uma das possíveis combinações de ajustes de escala, totalizando 120 ocorrências, como exemplifica a tabela abaixo.

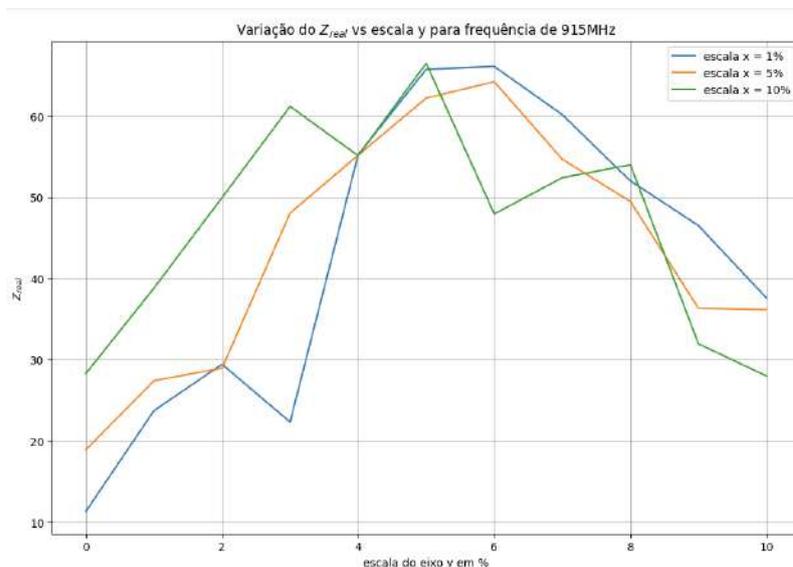
Tabela 2 – Variação paramétrica em 915 MHz

	<u>z_real</u>	<u>z_imag</u>	<u>escala_x</u>	<u>escala_y</u>
0	15.201716	185.140909	0.0	0.00
1	19.925331	196.660273	0.0	0.01
2	21.522505	192.844564	0.0	0.02
3	23.730958	196.363432	0.0	0.03
4	24.795122	188.660439	0.0	0.04
...
116	47.936478	128.914306	0.1	0.06
117	52.393905	139.374129	0.1	0.07
118	53.980510	142.332896	0.1	0.08
119	31.956531	134.613162	0.1	0.09
120	28.009356	131.400263	0.1	0.10

Fonte: Autoria própria.

Com essas informações, foi realizada a análise do comportamento da impedância quando ocorreram todas as variações de escala no eixo y e fixado no eixo x as variações de 1%, 5% e 10%. Como mostra a Figura 28, apesar da resposta não linear da impedância, é possível observar que existe um padrão no comportamento, para as diferentes escalas em x.

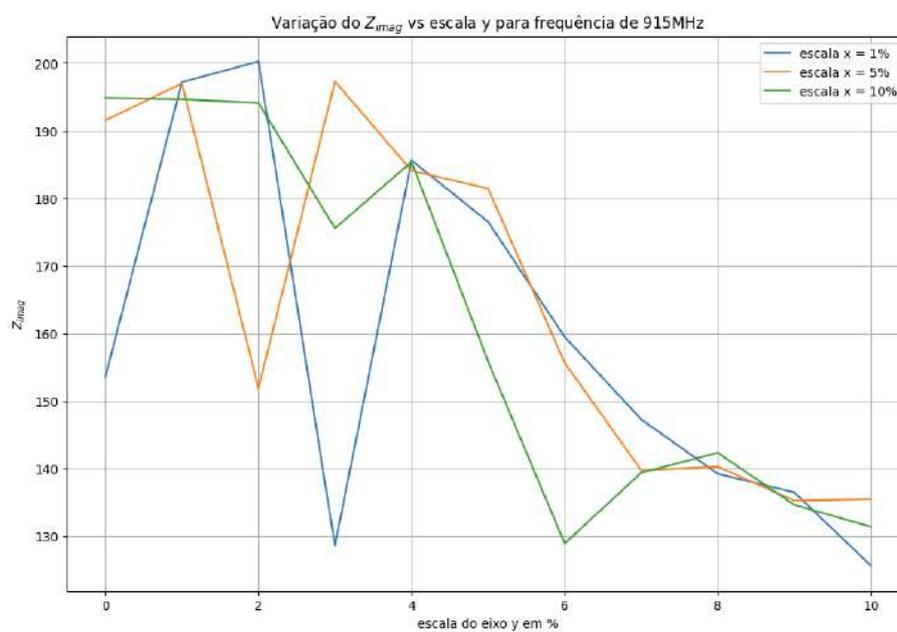
Figura 28 – Variação da parte real da impedância x Variação do eixo Y



Fonte: Autoria própria.

Já no caso da parte imaginária, como mostra a Figura 29, o comportamento não seguiu padrão algum. Porém, a partir das alterações entre 7% e 8% no eixo y, o resultados convergem para aproximadamente a mesma faixa de valores.

Figura 29 – Variação da parte imaginária da impedância x Variação do eixo Y



Fonte: Autoria própria.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento desse trabalho apresentou um estudo e análise de impedância de uma etiqueta RFID UHF passiva. Ao querer como objetivo específico a identificação de melhorias que viabilizem um casamento de impedância mais otimizado, em particular para a antena e etiqueta fabricadas e comercializada pela empresa NXP Semicondutores, que possui *chip* de impedância $22-195j \Omega$. Para além disso, também foi possível comparar a análise realizada com o relatório técnico disponibilizado pela fabricante.

Partindo de uma revisão bibliográfica focada em antenas e seus parâmetros, propagação de ondas UHF e os sistemas RFID. Para que dessa forma, fosse possível compreender o contexto e relevância da investigação e mapeamento de possíveis melhorias que proporcionem casamento entre a impedância da antena e etiqueta, visando potencializá-la.

Apesar de ser apenas um estudo de caso paramétrico que analisa especificamente a impedância da antena, através de simulação no software HFSS e visualização dos dados em Python, foi possível extrair experiências e resultados relevantes.

Acerca dos desafios encontrados durante execução da pesquisa, é importante mencionar a dificuldade em encontrar documentações sobre simulações eletromagnéticas no HFSS, o procedimento descrito nas sub-seção 3.2.1 foi disposto nesse trabalho de forma que possa auxiliar e servir de referência para outros trabalhos.

Para trabalhos a serem realizados futuramente, podem ser analisados outros parâmetros dessa antena, como diagrama de radiação, coeficiente de reflexão e ganho. Além disso, pode ser estudado e desenvolvido um sistema de recomendação onde seja possível inserir o valor da impedância do chip e o sistema retorne as alterações necessárias a serem feitas nas escalas y e x , para que o casamento de impedâncias seja realizado com mais eficiência.

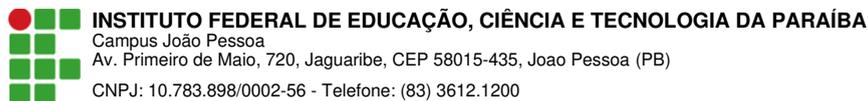
REFERÊNCIAS

- ANSYS. *Getting Started with HFSS - Probe Feed Patch Antenna*. [S.l.], 2013.
- BALANIS, C. A. *Antenna Theory: Analysis and Design*. 4. ed. [S.l.]: John Wiley Sons, 2016.
- BORGES, V. *RFID (Radio Frequency Identification)*. 2023. <<https://www.grupocpcon.com/rfid-o-que-e-e-como-funciona-essa-tecnologia/>>. Acesso em: 2023-07-06.
- COUTO, G. D.; MALAFAIA, T. S. *RFID - RADIO FREQUENCY IDENTIFICATION*. 2019. <<https://www.gta.ufrj.br/ensino/eel878/redes1-2019-1/vf/rfid/>>. Acesso em: 2023-07-06.
- DESCHAMPS, G. A. *Microstrip microwave antennas*. Washington, Estados Unidos: [s.n.], 1953. 18-22 p.
- FILHO, J. de M. *Desenvolvimento e modelagem de sensor de micro ondas para gotículas microfluídicas de emulsão*. 2021.
- GOOGLE. *Google Colaboratory*. 2023. <<https://colab.google/>>. Acesso em: 2023-07-06.
- GS1. *Overview of UHF frequency allocations (860 to 960 MHz) for RAIN RFID*. 2022. <https://www.gs1.org/docs/epc/uhf_regulations.pdf>. Acesso em: 2023-07-06.
- GUEDES, A. N. B. *Simulação de Tag RFID UHF Passiva para Rastreamento de Paletes Contendo Produtos Líquidos*. 2017.
- IEEE Standard Definitions of Terms for Antennas. *IEEE Std 145-1993*, p. 1–32, 1993.
- LUBNA et al. Iot-enabled vacant parking slot detection system using inkjet-printed rfid tags. *IEEE Sensors Journal*, v. 23, n. 7, p. 7828–7835, 2023.
- MARROCCO, G. Gain-optimized self-resonant meander line antennas for rfid applications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, v. 2, p. 302–305, 2003.
- MARROCCO, G. The art of uhf rfid antenna design: impedance-matching and size-reduction techniques. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, v. 50, n. 1, p. 66–79, 2008.
- NARANG, M. Top 11 programming languages for data science. *Knowledge Hut*, Jun 2023. Visited on: 2023-07-01. Disponível em: <<https://www.knowledgehut.com/blog/data-science/programming-languages-for-data-science>>.
- NXP. *AN 1629 UHF RFID Label Antenna*. [S.l.], 2008.
- RIOS, L. G.; PERRI, E. B. *Engenharia de Antenas*. [S.l.]: Blucher, 2002.
- ROBERTI, M. *The History of RFID Technology*. 2005. <<https://www.rfidjournal.com/the-history-of-rfid-technology>>. Acesso em: 2023-07-06.
- SADIKU, M. N. O. *Elementos de Eletromagnetismo*. [S.l.]: Bookman, 2004.

SANTINI, A. G. *RFID: Conceitos, Aplicabilidades e Impactos*. [S.l.]: Editora Ciência Moderna, 2008.

SILVA, A. N. da. *Novas Técnicas de Otimização de Casamento de Impedância de Antenas Planares para Sistemas de Comunicação Sem Fio*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2019.

SILVEIRA, D. Identificação por radiofrequência: Aplicação em indústria. *Eletrônica Total, Saber*, v. 156, n. 2, p. 24–28, 2013.



Documento Digitalizado Ostensivo (Público)

Trabalho de Conclusão de Curso

Assunto: Trabalho de Conclusão de Curso
Assinado por: Ana Beatriz
Tipo do Documento: Anexo
Situação: Finalizado
Nível de Acesso: Ostensivo (Público)
Tipo do Conferência: Cópia Simples

Documento assinado eletronicamente por:

- **Ana Beatriz de Souza Nogueira Rodrigues de Oliveira, ALUNO (20181610011) DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - JOÃO PESSOA**, em 15/08/2023 15:31:26.

Este documento foi armazenado no SUAP em 15/08/2023. Para comprovar sua integridade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/verificar-documento-externo/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 909608
Código de Autenticação: 8f51bfc0e9

