

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

DANIEL OLIVEIRA DOS SANTOS

**DESENVOLVIMENTO DE ANTENAS UHF PLANARES FLEXÍVEIS POR
SUBTRAÇÃO QUÍMICA**

CAMPO MOURÃO

2023

DANIEL OLIVEIRA DOS SANTOS

**DESENVOLVIMENTO DE ANTENAS UHF PLANARES FLEXÍVEIS POR
SUBTRAÇÃO QUÍMICA**

**DEVELOPMENT OF FLEXIBLE PLANAR UHF ANTENNAS BY CHEMICAL
ETCHING**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Eletrônica do Curso de Bacharelado em Engenharia Eletrônica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Osmar Tormena Júnior

CAMPO MOURÃO

2023



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

DANIEL OLIVEIRA DOS SANTOS

**DESENVOLVIMENTO DE ANTENAS UHF PLANARES FLEXÍVEIS POR
SUBTRAÇÃO QUÍMICA**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Eletrônica
do Curso de Bacharelado em Engenharia
Eletrônica da Universidade Tecnológica Federal
do Paraná (UTFPR).

Data da aprovação: 7/junho/2023

Marcelo Nanni
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Osmar Tormena Júnior
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Roberto Wilhelm Krauss Martinez
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**CAMPO MOURAO
2023**

RESUMO

Etiquetas planares passivas de identificação por radiofrequência, (*Radio Frequency IDentification – RFID*) em ultra-alta frequência (*Ultra High Frequency — UHF*) tem um aumento na demanda nos últimos anos, graças a sua maleabilidade quanto às aplicações podendo ser implementadas em todo tipo de produtos e materiais, podendo serem usadas para fins como controle de estoque, garantia da integridade de produtos como selos contra violação, prevenção de roubo de produtos, controle de frota de veículos, controle de acesso à áreas controladas, etc. A necessidade do desenvolvimento de novos modelos que atendam com eficiência a esses diversos campos de aplicação é oportuno. Criar mais antenas utilizando novas tecnologias aumentando o ganho quando conveniente, diminuindo o tamanho da antena sem perder eficiência, afinal a eficiência de uma antena RFID depende diretamente de seu tamanho, da sua eficiência de reflexiva, condutiva, dielétrica e do material que está aplicada. Por exemplo, etiquetas projetadas para materiais mais capacitivos ou isolantes como vidro ou borracha possuem, normalmente, desempenho menor que etiquetas do mesmo dimensional projetadas para materiais que interferem menos em suas propriedades eletromagnéticas como papelão ou mesmo etiquetas tipo bandeiras, que não são aplicadas diretamente no material, mas são fixas por um adesivo como bandeira. O desempenho esperado das etiquetas RFID deve ser considerado logo no início do projeto. Este trabalho tem como objetivo demonstrar o procedimento de prototipação de uma antena RFID, abrangendo os principais requisitos das antenas planares.

Palavras-chave: tagformance; projeto; dipolo; rfid; mmla.

ABSTRACT

Passive planar radio frequency identification tags, RFID in Ultra-High Frequency - UHF has been an increased demand in recent years, thanks to its flexibility regarding applications that can be implemented in all kinds of products and materials. It can be used for purposes such as inventory control, ensuring product integrity with tamper-evident seals, theft prevention, fleet vehicle management, access control to restricted areas, and more. The need for developing new models that efficiently serve these diverse fields of application is timely. Creating more antennas using new technologies to increase the gain and reducing the size of the antenna without sacrificing efficiency, as the efficiency of an RFID antenna directly depends on its size, reflective, conductive, dielectric properties, and the material to which it is applied. For example, tags designed for more capacitive or insulating materials like glass or rubber usually have lower performance compared to tags of the same dimensions designed for materials that have less interference with their electromagnetic properties, such as cardboard or even flag-type tags that are not directly applied to the material but are fixed using an adhesive like a flag. The expected performance of RFID tags should be considered early in the design process. This work aims to demonstrate the prototyping procedure of an RFID antenna, covering the main requirements of planar antennas.

Keywords: tagformance; project; dipole; rfid; mmla.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
1.1	Considerações iniciais	7
1.1.1	ISO 18.000-6C	9
1.2	Objetivos	9
1.2.1	Objetivo geral	9
1.2.2	Objetivos específicos	9
1.3	Justificativa	10
2	REFERENCIAL TEÓRICO	11
2.1	Introdução a antenas	11
2.1.1	Características básicas de uma antena RFID	11
2.2	Circuitos Integrados (CI) - RFID	13
2.2.1	Tecnologia RFID	14
2.2.2	Designs comuns de antenas RFID	14
2.2.3	Etiquetas Ativas e Passiva	16
2.2.4	Encapsulamento	18
2.3	Uma visão geral da tecnologia RFID	19
2.3.1	Sistema básico RFID	19
2.3.2	Kiloway KX2005X	20
2.3.3	Estrutura do Chip KX2005X-S	20
2.3.4	Impedância Equivalente do CHIP	21
2.3.5	Antenas de linha dobrada	22
2.4	Fotolitografia	24
3	MATERIAIS E MÉTODOS	25
3.0.1	Análises obtidas por meio da câmara anecoica	25
3.1	Prototipação utilizando corrosão	27
3.2	Simulações	27
3.3	Caracterização da etiqueta	29
4	RESULTADOS	30
4.1	Caracterização do Loop	30
4.2	Caracterização do Meander	31

4.3	Melhorias no design	34
4.4	Prototipação	35
4.4.1	Preparação da placa de circuito impresso flexível:	35
4.4.2	Aplicação do foto-resistente:	36
4.4.3	Exposição à luz UV:	37
4.4.4	Revelação:	37
4.4.5	Corrosão	38
4.4.6	Montagem do Chip	40
4.4.7	Conversão:	40
4.5	Obtenção da Curva Característica	42
5	CONCLUSÃO	45
	REFERÊNCIAS	46

1 INTRODUÇÃO

A Identificação por Radiofrequência (RFID — *Radio-Frequency Identification*) é uma tecnologia utilizada para identificar, rastrear e gerenciar documentos e produtos e até mesmo animais ou indivíduos, sem contato nem a necessidade de um campo visual através de ondas eletromagnéticas (MARQUES, 2009).

Para iniciar, é necessário esclarecer a identificação de materiais. A identificação de um material é realizada através da descrição do item, tornando-o único em relação aos outros, baseado em suas características físicas, químicas e de aplicação.

A maioria das indústrias utiliza a técnica de codificação para cada produto, criando um código específico para facilitar a comunicação interna sobre padronização de materiais, aquisições e armazenamento. Isso ajuda a gerenciar os materiais em estoque e durante a produção, a controlar os ativos e insumos da empresa, evitando a duplicação de itens e trazendo outros benefícios.

A codificação pode ser realizada de várias formas, incluindo métodos de gravação direto no material, etiquetas adesivas com códigos de barras, códigos QR ou etiquetas identificadoras de radiofrequência. Dependendo do tipo de material e do uso pretendido, uma opção pode ser mais adequada do que outra.

A identificação de materiais é uma parte fundamental da gestão de estoque e de produção, e pode trazer muitos benefícios para a empresa, incluindo redução de custos, maior eficiência e melhor controle contábil.

1.1 Considerações iniciais

A primeira aplicação real de RFID foi observada durante a Segunda Guerra Mundial, quando a força aérea inglesa criou um sistema para identificação de seus aviões, a fim de evitar acidentalmente o “fogo amigo” (WEIS, 2006).

O Departamento de Defesa Norte-Americano, com estudos e aplicações na Logística Militar e as cadeias de suprimento varejistas de grandes corporações, têm contribuído fortemente para o desenvolvimento da tecnologia por RFID.

Glover e Bhatt (GLOVER B.; BHATT, 2007), especialistas em arquitetura de sistemas RFID, fazem previsões sobre o que pode vir no futuro e consideram que o tempo de existência da tecnologia pode ser dividido da seguinte forma:

1. Período Proprietário — com a redução do tamanho e durabilidade maior dos transistores, após a Segunda Guerra Mundial, com baterias melhoradas, circuitos e micro-chips, foi possível a utilização dos transmissores (identificadores) em aplicações de registro de itens menos valiosos. A utilização tornou-se mais intensa, a partir da década de 1980, para registros de vagões ferroviários, na identificação de chassis de automóveis,

na linha de montagem e também, para registrar gado leiteiro. Na década de 1990, a indústria de carne utilizou identificadores de orelha de cinco dólares, para registro de dados de origem e rastreabilidade do gado. A reutilização dos identificadores e fraco suporte ao compartilhamento de informações caracterizaram esse período.

2. Período de Compatibilidade (período corrente) — A queda brusca nos preços de semicondutores e a grande adoção de rede de banda larga, no final do século XX, iniciaram este período. O Departamento de Defesa Norte-Americano, a WalMart e a Tesco começaram a exigir que seus fornecedores identificassem contêineres e itens individuais, com identificadores RFID. Esses fornecedores não viram as aplicações que integram RFID nos processos internos como vantagem para os seus negócios, mas, sim, como um único benefício para os grandes clientes.
3. Período das Empresas com RFID — Os padrões se estabilizam e os custos dos componentes caem. As organizações começarão a implementar o registro RFID, em seus processos internos, com os benefícios de controle de perecibilidade e temperatura. Estoques com código de barras de uso intensivo serão substituídos por estoques com varreduras. A implementação de sensores nas portas para registro de entrada e saída de cada item nos depósitos, será intensificada. As oportunidades de comunicação plena entre as empresas da cadeia de fornecimento, através do compartilhamento de informações, ainda estarão limitadas, devido à falta de acordos e segurança.
4. Período das Indústrias com RFID — Neste período, padrões RFID, redes de informações RFID, acordos de negócio e segurança abrangente e políticas de privacidade se consolidaram, ao ponto em que indústrias e cadeias de suprimento estejam integradas e compartilhem das informações. Naturalmente, a redefinição das informações sensíveis será fundamental para a evolução desta fase. As margens de segurança dos estoques diminuirão, com os tempos e custos de realização, devido a roubos e erros.
5. Período da Internet — O período final será disparado pela intensa disseminação da tecnologia RFID. Custos mais baixos e maior demanda de informações tornarão comerciais as tecnologias existentes e se distribuirão em varejistas, indústrias, fazendas e lares. Identificadores RFID farão parte da concepção do produto. Produtos poderão ser rastreados via Internet e mais informações sobre produtos e equipamentos poderão ser alcançadas, utilizando-se a rede mundial de comunicações.

Na atualidade, a sociedade está cada vez mais inserida em um contexto de comunicação, informação e controle, o que possibilita a utilização de tecnologias como o RFID. Sua importância se dá pela alta agregação de valor, fidelidade e precisão das informações, visto que cada etiqueta possui um número de identificação único, o EPC (*Electronic Product Code*), ou código eletrônico de produto em português, que pode ser modificado de acordo com os padrões

internos da empresa, com o intuito de acelerar o controle de estoque e identificação das etiquetas. Além disso, como as etiquetas podem ser utilizadas em diversos materiais, o mercado para as indústrias é vasto e as pesquisas sobre soluções em RFID tendem a trazer vantagens competitivas e inovações no meio tecnológico (ISO, 2005).

1.1.1 ISO 18.000-6C

A norma ISO/IEC 18000-6:2010 define a interface de ar para dispositivos de identificação por radiofrequência (RFID) que operam na faixa de 860 MHz a 960 MHz, conhecida como banda Industrial, Científica e Médica (ISM), utilizada em aplicações de gerenciamento de itens. Ela fornece uma especificação técnica comum para dispositivos RFID que pode ser utilizada por comitês da ISO no desenvolvimento de padrões de aplicação de RFID. A ISO/IEC 18000-6:2010 tem como objetivo permitir a compatibilidade e incentivar a interoperabilidade de produtos no crescente mercado de RFID no âmbito internacional.

Ela define os parâmetros de ligação direta e de retorno para atributos técnicos, incluindo, mas não limitados a, frequência de operação, precisão do canal de operação, largura de banda do canal ocupado, potência isotrópica radiada efetiva máxima (EIRP), emissões espúrias, modulação, ciclo de trabalho, codificação de dados, taxa de bits, precisão da taxa de bits, ordem de transmissão de bits e, quando apropriado, canais de operação, taxa de salto de frequência, sequência de salto, sequência de espalhamento e taxa de chip. Além disso, ela define o protocolo de comunicação utilizado na interface de ar (ISO, 2005).

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Demonstrar o desenvolvimento completo de uma antena planar UHF passiva RFID, desde o escopo do projeto, dimensionamento dos parâmetros. Tais como: alcance de leitura, material a ser aplicado, sensibilidade de leitura do CI (Circuito Integrado) e demonstrar a prototipação utilizando subtração química.

1.2.2 Objetivos específicos

- Dimensionar uma antena que atenda às normas ISO 18.000-6C;
- Desenvolver uma geometria de antena que tenha um alcance de pelo menos 10 metros;
- Simular a resposta da geometria da antena no software HFSS;

- Gerar gráficos teóricos de resposta em frequência;
- Realizar a prototipação utilizando subtração química.

1.3 Justificativa

O conteúdo deste trabalho pode melhorar o desenvolvimento de tecnologia não somente para uma indústria em específico mas à todos os interessados nesta tecnologia pois simplifica o processo de prototipagem, desde o design, simulação, prototipação, ajuste até chegar em um modelo ideal de antenas RFID o que permitirá uma diminuição significativa do tempo para as pesquisas na área de IoT o que por sua vez resultará em maior tempo disponível para novas pesquisas com informações mais rápidas sendo descobertas, o avanço tecnológico é eminente

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Introdução a antenas

Uma antena converte campos de circuitos ligados em ondas eletromagnéticas propagantes e, por reciprocidade, coleta energia das ondas eletromagnéticas que passam por ela. As equações de Maxwell preveem que qualquer campo elétrico ou magnético variável no tempo produz o campo oposto e forma uma onda eletromagnética. A onda tem seus dois campos orientados ortogonalmente e se propaga na direção normal ao plano definido pelos campos elétrico e magnético perpendiculares. O campo elétrico, o campo magnético e a direção de propagação formam um sistema de coordenadas dextrógiras (de mão direita). A intensidade do campo de onda propagante diminui em $\frac{1}{R}$ afastando-se da fonte, enquanto um campo estático. A queda ocorre em $\frac{1}{R^2}$. Qualquer circuito com campos variáveis no tempo tem a capacidade de irradiar em certa medida (MILLIGAN, 2005).

Consideramos apenas campos harmônicos no tempo e usamos a notação de fasor com dependência temporal $e^{j\omega t}$. Uma onda propagante para fora é dada por $e^{-j(kR-\omega t)}$, onde k , o número de onda, é dado por $\frac{2\pi}{\lambda}$. λ é o comprimento de onda da onda, dado por $\frac{c}{f}$, onde c é a velocidade da luz (3×10^8 m/s no espaço livre) e f é a frequência. Aumentar a distância da fonte diminui a fase da onda (MILLIGAN, 2005).

Considere uma linha de transmissão de dois fios com campos ligados a ela. As correntes em um único fio irão irradiar, mas desde que o caminho de retorno à terra esteja próximo, sua radiação quase cancelará a radiação do outro fio porque os dois estão fora de fase em 180° e as ondas percorrem aproximadamente a mesma distância. À medida que as linhas se afastam cada vez mais, em termos de comprimentos de onda, os campos produzidos pelas duas correntes não se cancelarão mais em todas as direções. Em algumas direções, o atraso de fase é diferente para a radiação de cada corrente na linha, e a energia escapa da linha. Evitamos que os circuitos irradie fornecendo retornos à terra próximos. Portanto, a lógica de alta velocidade requer planos de terra para reduzir a radiação e a interferência indesejada entre sinais (MILLIGAN, 2005).

2.1.1 Características básicas de uma antena RFID

As antenas usadas na tecnologia de RFID normalmente são do tipo planar, geralmente antenas de micrófita. No entanto, dependendo da natureza de uso, elas podem ser do tipo corneta, túnel, *loop*, planar dupla, entre outras. As antenas podem ser elementos individuais ou uma matriz de elementos, dependendo dos propósitos e das naturezas das implantações. As antenas podem ser passivas ou ativas, com recursos de deslocamento de feixe também. Várias antenas colocadas em ângulos e distâncias diferentes podem ser controladas por um

interrogador que estaria sincronizando o ciclo de trabalho delas e, assim, realizando uma leitura efetiva das etiquetas (KARMAKAR, 2010). Alguns parâmetros de antenas RFID são:

Link Budget e Read Range — O *Link Budget* calcula para o transmissor e o receptor, o ganho e a potência isotrópica radiada efetiva (EIRP) da antena do leitor para obter uma determinada distância de acionamento (alcance de leitura). O *Link Budget* ajuda a calcular o ganho de antena necessário e as especificações para obter uma comunicação robusta e viável nas condições específicas das comunicações sem fios. A comunicação do leitor com a etiqueta é designada por *Downlink* ("ligação descendente") e a comunicação da etiqueta para o leitor é designada por *Uplink* ("ligação ascendente"). Por conseguinte, o *Link Budget* é um cálculo utilizado para especificar o alcance de leitura em qualquer sistema RFID (KARMAKAR, 2010).

Fatores como o ruído de fundo, as perdas nos cabos, as perdas no espaço livre, perdas de cabos, etc., são tidos em conta no cálculo do orçamento da ligação (KARMAKAR, 2010).

Backscatter - Rádio de retrodifusão é um termo que se refere a sistemas que comunicam sem fios por dispersão de ondas eletromagnéticas. Num sistema típico de rádio retrodifusão, um pequeno transpônder de baixa potência, ou etiqueta de radiofrequência, comunica com um interrogador, ou leitor, modulando as ondas da sua antena. Embora este método de comunicação permita que o transpônder comunique consumindo muito pouca energia, a concepção do sistema é difícil devido às complexas interações eletromagnéticas entre o leitor, a etiqueta RF e o canal de rádio. Estas interações afetam o desempenho da rádio de retrodifusão, limitando a quantidade de potência recebida pela etiqueta RF e/ou a quantidade de potência modulada para o leitor. Se qualquer uma destas potências cair abaixo de um determinado limiar, o funcionamento da etiqueta RF será interrompido e/ou o leitor não conseguirá detectar de forma confiável o sinal retro-difundido. Por conseguinte, é extremamente importante para a concepção e funcionamento de sistemas modulados de retrodifusão que estas potências recebidas sejam previstas (KARMAKAR, 2010).

Radiation Pattern - O padrão de Irradiação, para qualquer antena real, nunca é esférica ou omnidirecional por natureza. É mais potente em certas direções no espaço, enquanto é menos potente nas outras direções. A vista gráfica tridimensional do padrão de potência de qualquer antena é chamado de padrão de radiação.

O padrão de radiação consiste em:

1. um lóbulo principal onde a intensidade é máxima
2. alguns lóbulos laterais que apontam para diferentes direções e não contribuem para o desempenho da antena.

O padrão de radiação é muito importante para determinar a zona de interrogação para qualquer operação de RFID, pois mostra a área de funcionamento ótimo (lóbulo principal) e fontes de interferências (lóbulos laterais)(KARMAKAR, 2010).

Frequência Ressonante - Qualquer antena transmite ou recebe ondas eletromagnéticas de forma mais eficiente em uma ou algumas frequências, dependendo do design. Essa(s) frequência(s) é(são) chamada(s) de "frequência ressonante"(KARMAKAR, 2010).

2.2 Circuitos Integrados (CI) - RFID

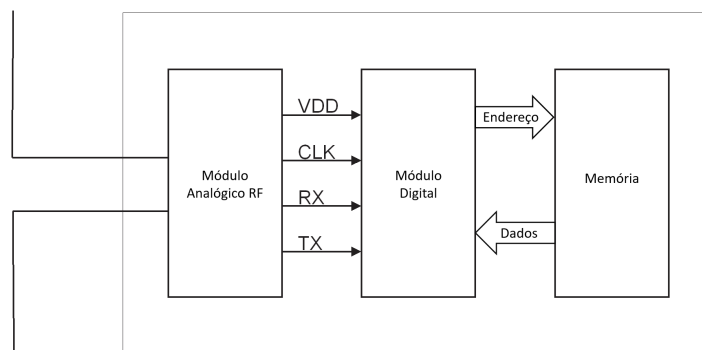
Trata-se de um circuito semicondutor normalmente concebido por um fabricante de *Wafers* por litografia de silício. Os fabricantes de etiquetas compram os chips normalmente de grandes fabricantes de circuitos integrados RFID.

O CI é constituído por circuitos lógicos que controlam o número de identificação único e todas as outras informações transportadas pela etiqueta, como mostrado na Figura 1.

O CI divide-se, grosso modo, nas seguintes partes:

- Uma parte do CI é dedicada ao controle da alimentação. Esta energia pode provir de uma bateria (semi passiva/ativa) ou da energia irradiada pelo leitor/interrogador (passiva).
- Modulação/demodulação dos sinais, codificação/descodificação dos bits digitais, e a implementação do protocolo de comunicação têm lugar no CI..
- A memória está dividida em blocos chamados "bancos", que podem ser apenas de leitura ou de leitura e escrita, consoante a utilização. O número de identificação único, códigos de verificação de erros, palavras-passe públicas e privadas, etc., são armazenados na memória do CI (KARMAKAR, 2010).

Figura 1 – Diagrama de blocos do CHIP



Fonte: Adaptado de Kiloway(2013).

2.2.1 Tecnologia RFID

A tecnologia RFID, utiliza diferentes faixas de frequência para transmitir informações entre etiquetas e leitores. As faixas de frequência mais comuns, como apresentadas na Tabela 1, são: LF (*low frequency* - baixa frequência), HF (*high frequency* - alta frequência) e UHF (ultra alta frequência).

A faixa de frequência LF é geralmente usada em aplicações que exigem distâncias de leitura curtas, como sistemas de controle de acesso ou de identificação de animais de estimação. Essa faixa de frequência varia entre 125 kHz e 134 kHz. Já a faixa de frequência HF é amplamente usada em aplicações como pagamento por aproximação (*do inglês contactless*), identificação de produtos e cartões de transporte público. A principal frequência desta categoria é 13,56 MHz e é adequada para leituras em distâncias médias (alguns centímetros).

Por fim, a faixa de frequência UHF é usada em aplicações que exigem leituras de longa distância (superiores a 10 metros), como no rastreamento de bens em logística e controle de inventário em grandes armazéns. Ela varia entre 860 MHz e 960 MHz e é capaz de ler múltiplas etiquetas simultaneamente.

Cada faixa de frequência tem suas próprias vantagens e limitações, e a escolha da faixa de frequência depende do tipo de aplicação em que o RFID será utilizado (CANADA, 2012).

Tabela 1 – Principais Frequências RFID

Nome	Intervalo de Frequência	Frequências ISM
LF	30–300 kHz	< 135 kHz
HF	3–30 MHz	6,78, 13,56, 27,125 e 40,68 MHz
UHF	0,3–3 GHz	433,92, 869 e 915 MHz
Microondas	> 3 GHz	2,45, 5,8 e 24,125 GHz

Fonte: Adaptado de ANATEL(2017).

2.2.2 Designs comuns de antenas RFID

A maioria das etiquetas UHF-RFID de propósito geral são baseadas em antenas dipolares planares. Na verdade, esse tipo de antena é simples, eficiente e versátil. Sua geometria pode ser ajustada para uma grande variedade de formas, como podemos observar na Figura 2 onde as antenas (não desenhadas em escala) são classificadas por tipo:

- A. Meandro
- B. Refletores
- C. Combinação de Meandro e refletores
- D. Alargamento do dipolo

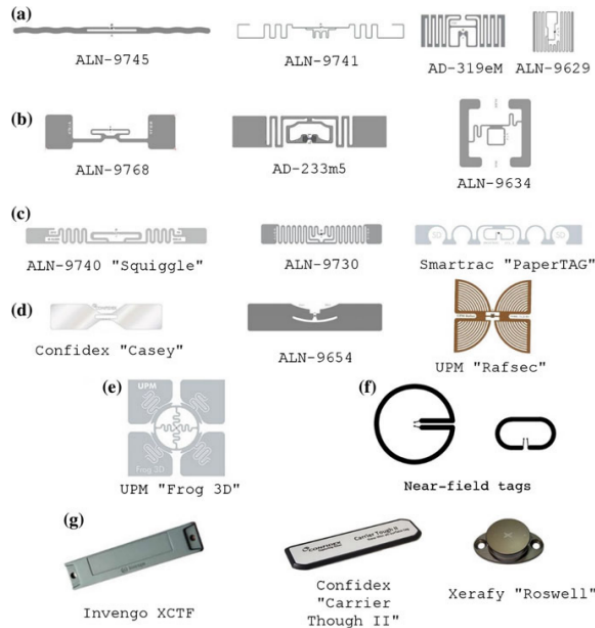
- E. Radiadores ortogonais
- F. Antenas de pequeno laço
- G. Antenas amigáveis ao metal

O tipo mais comumente conhecido de antena dipolo é o dipolo de meia onda, que consiste em dois fios lineares cujo comprimento total é aproximadamente igual à metade do comprimento de onda na frequência de operação. No entanto, como um meio comprimento de onda na faixa UHF RFID excede 15 cm, antenas dipolo de meia-onda não modificadas raramente são usadas em etiquetas de propósito geral. Em vez disso, técnicas de redução de tamanho são geralmente empregadas para obter versões menores da antena dipolo de meia-onda. Entre elas, a mais comumente usada é o método de "*meandering*" (zigue-zague), que envolve dobrar o corpo irradiante um certo número de vezes, reduzindo suas dimensões laterais, enquanto mantém seu comprimento total substancialmente inalterado. Ao projetar uma antena dipolo, o *meander* pode ser aplicado em um certo grau, de modo que o tamanho da etiqueta resultante possa ser ajustado de acordo com as restrições da aplicação (ZUFFANELLI, 2017).

Enquanto as dimensões finais da maioria das etiquetas de propósito geral que utilizam o *meanders* estão na faixa de 7 a 10 cm, um *meander* intenso permite obter etiquetas cujo tamanho é reduzido para poucos centímetros. No entanto, a redução de tamanho proporcionada pelos *meanders* da antena dipolo é sempre compensada por uma redução no desempenho da tag. Na verdade, enquanto todos os elementos de corrente em um dipolo reto contribuem positivamente para a radiação, as correntes nos braços vizinhos de um *meander* fluem em direções opostas, de modo que suas contribuições para a radiação são quase totalmente canceladas. Em um dipolo com *meander* intenso, apenas uma pequena parte da corrente contribui para a radiação, enquanto o restante produz perdas de energia devido ao aquecimento ôhmico dentro dos condutores não perfeitos. Assim, a resistência da antena adquire valores muito pequenos, dificultando o casamento de impedância com o circuito integrado de aplicação específica, e sua eficiência de radiação diminui, resultando em uma degradação significativa do desempenho da tag. Além disso, por pertencerem à categoria de antenas eletricamente pequenas, os dipolos com *meanders* intenso são caracterizados por uma redução significativa da largura de banda, de acordo com limitações físicas bem conhecidas.

Por esses motivos, existe um equilíbrio entre o grau de *meanders* e o desempenho da antena, e o tamanho da antena raramente é reduzido abaixo de 3 cm para etiquetas comerciais (ZUFFANELLI, 2017).

Figura 2 – Exemplos de etiquetas comerciais de RFID passivo UHF



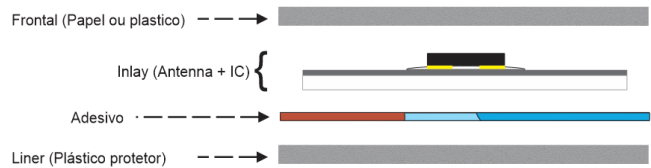
Fonte: Adaptado de Zuffanelli(2017).

2.2.3 Etiquetas Ativas e Passiva

A funcionalidade básica do RFID é a identificação. Quando questionadas por um leitor, as etiquetas retornam algum identificador que pode ser usado para recuperar outros registros de dados (WEIS, 2006).

Uma etiqueta consiste em um chip e uma antena encapsulada numa embalagem para formar uma etiqueta utilizável como mostrado na Figura 3 abaixo.

Figura 3 – Componentes Básicos de uma etiqueta RFID.



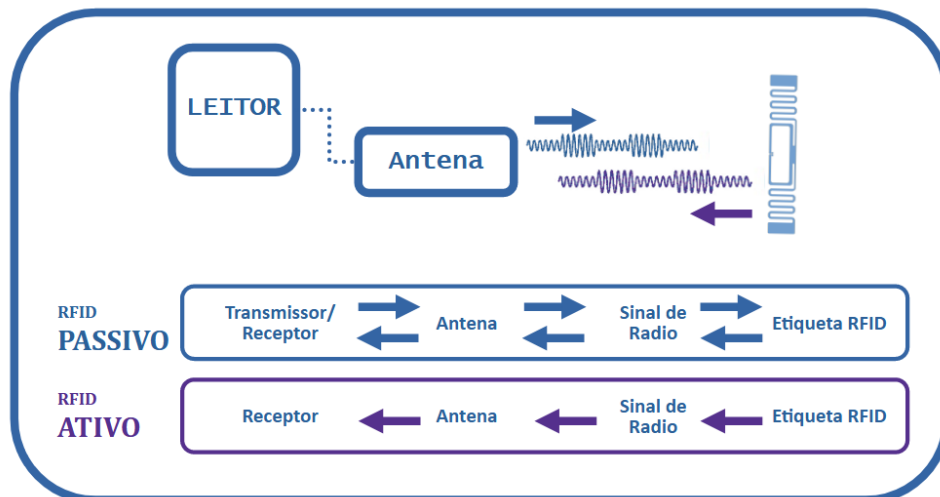
Fonte: Autoria Própria (2023).

Uma etiqueta RFID é ativa se possuir uma fonte de energia própria. Quando a etiqueta precisa de transmitir dados para o leitor, utiliza desta fonte para a transmissão. Devido a isto, as etiquetas ativas podem se comunicar com leitores menos sensíveis e podem transmitir informação por distâncias maiores em relação às etiquetas passivas, até centenas de metros. Além disso, esta categoria de etiqueta possui normalmente memórias maiores, até 128 kilobytes. No entanto, são muito maiores e mais complexas do que os as passivas, tornando-as mais caras de se produzir (ZUFFANELLI, 2017).

As etiquetas RFID passivas não possuem fonte de alimentação independente. Ao invés disso, a energia necessária para que o transpônder entre em funcionamento é fornecida pelo sinal enviado pelo leitor.

A comunicação entre o leitor e etiquetas passivas é baseada no princípio de modulação de sinal por retrodifusão. A etiqueta inicialmente em uma condição inativa com um bom casamento de impedância entre o CI e a antena, consegue absorver toda energia enviada pela antena do leitor. Uma vez que, a quantidade mínima de energia é fornecida para ativar-lo, esse valor sendo a sensibilidade do CI, normalmente mostrado no *datasheet* do CI, o transpônder muda sua impedância de entrada de forma que o sinal eletromagnético é refletido de volta para o leitor. O estado da impedância alterna para gerar uma serie de codificações por reflexão, que contém a informação requisitada pelo sinal do leitor (ZUFFANELLI, 2017). A comparação entre os dois tipos de etiquetas mais comuns pode ser visualizada na Figura 4.

Figura 4 – Funcionamento Etiqueta Ativa x Passiva



Fonte: Autoria Própria (2023).

Algumas etiquetas passivas possuem fonte de alimentação interna, mas a utilizam apenas para ajudar na transmissão do sinal. Ou seja, essas não enviam sinal sem que um leitor as interroge antes.

Esta categoria de etiquetas passivas são chamados de: etiquetas assistidas por bateria (*Battery-assisted passive - BAP*) e utilizam a bateria apenas para alimentar a eletrônica embarcada. Por exemplo, um produtor pode aplicar etiquetas RFID equipadas com sensores de temperatura em paletes, de modo a monitorar a temperatura dos seus produtos durante a expedição e armazenamento. Se a temperatura do produto subir acima de um certo nível, esse evento poderia ser marcada na etiqueta automaticamente pelo sensor. Mais tarde, no momento da entrega ou venda, a etiqueta poderia ser verificada para assegurar se armazenamento durante o envio foi adequado (ZUFFANELLI, 2017).

Devido ao grande número de campos de aplicação da tecnologia RFID, cada um apresentando requisitos específicos, as etiquetas RFID passivas têm evoluído para diversos tipos

otimizados para aplicações diferentes. O mercado atual oferece uma variedade de etiquetas otimizadas para serem montadas em vidro, ou fixadas a objetos que contêm líquidos, ou usadas por pessoas. (ZUFFANELLI, 2017)

Etiquetas especiais projetadas para serem montadas em superfícies metálicas, ou para serem anexadas a objetos que contenham peças metálicas, estão disponíveis atualmente. No entanto, uma parte importante do mercado atual é dominada por etiquetas de propósito geral. Essas etiquetas são economicamente viáveis e, em vez de serem otimizadas para uma aplicação específica, são projetadas para operar em uma ampla variedade de aplicações. Uma clara vantagem das etiquetas de propósito geral é que o usuário pode comprar um grande número do mesmo modelo de etiquetas e usá-lo para marcar diferentes itens. Obviamente, essas etiquetas podem sofrer uma degradação significativa de desempenho ao serem anexadas a alguns objetos que contêm líquidos ou metais, tornando necessário o conhecimento prévio sobre cada item marcado para garantir bons resultados (ZUFFANELLI, 2017).

2.2.4 Encapsulamento

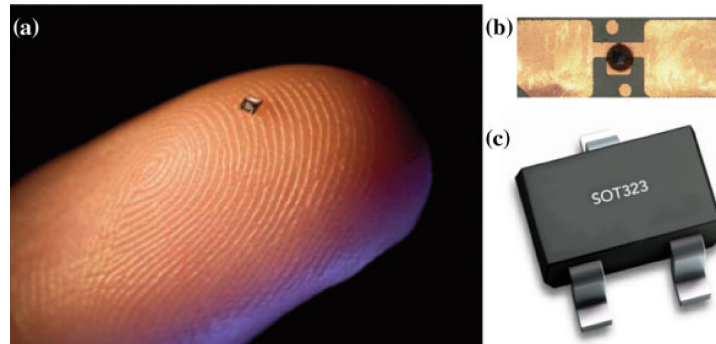
Existem várias soluções para o encapsulamento dos chips, como mostrado na Figura 5, cada uma otimizada para um processo de montagem específico na etiqueta final.

Quando a etiqueta é fabricada como um rótulo em linhas de montagem altamente produtivas, o chip não encapsulado, como apresentado na Figura 5-A, é diretamente fixado à antena, geralmente por meio de técnicas de *flip-chip*. Essa solução permite a produção rápida, eficiente e em bobinas de *inlays* muito finas e confiáveis, mas também requer um investimento inicial alto.

Por esse motivo, os fabricantes também oferecem uma solução alternativa, que consiste em pré-montar o chip em uma pequena alça de polímero fornecida com *PADs* metálicos conectadas aos *PADs* de entrada do chip, como exemplificado na Figura 5-B. As alças são assim montadas na etiqueta usando linhas de montagem menos dispendiosas, mas a confiabilidade e durabilidade do produto final são menores, devido à presença de um processo mais complexo e uma conexão dupla.

Uma terceira solução, principalmente direcionada para prototipagem de etiquetas, emprega encapsulamento convencional de chips SMD (*Surface Mounted Device* ou dispositivo de montagem em superfície), demonstrado na Figura 5-C, para permitir fácil montagem em etiquetas experimentais baseadas em placas de circuito impresso (ZUFFANELLI, 2017).

Figura 5 – A. Chip não encapsulado, B. Strap e C. Encapsulamento SOT-323



Fonte: Adaptado de Zuffanelli (2017).

2.3 Uma visão geral da tecnologia RFID

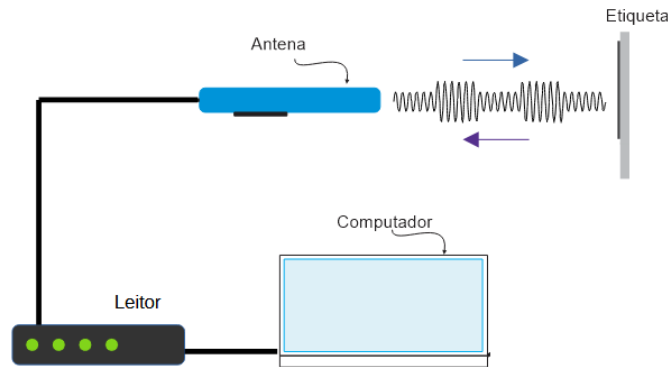
2.3.1 Sistema básico RFID

O sistema RFID é composto por 4 principais componentes, como ilustrado na Figura 6:

1. Uma etiqueta (por vezes designada por transpônder), que é composta por um chip semicondutor, uma antena e, por vezes, uma bateria;
2. Um interrogador (por vezes designado por leitor ou dispositivo de leitura/escrita), que é composto por uma antena, um módulo eletrônico de radiofrequência e um módulo eletrônico de controle;
3. Um controlador, que assume mais frequentemente a forma de um computador ou de uma estação de trabalho que executa software de base de dados e de controle (frequentemente designado por *middleware*).
4. Um leitor que está conectado a uma antena, podendo essa antena estar integrada ao leitor ou não. O leitor reconhece a presença da etiqueta RFID e lê as informações armazenadas nela. Em seguida, um software entra em ação, processando e exibindo os dados obtidos a partir das informações das etiquetas fornecidas pelos leitores (GLOVER B.; BHATT, 2007).

A etiqueta e o leitor trocam informações entre si por ondas de rádio. Quando uma etiqueta RFID entra na zona de leitura de um leitor, o leitor sinaliza a etiqueta para transmitir os seus dados armazenados. Na etiqueta podem conter muitas informações sobre os objetos a que estão ligados, incluindo números de série, carimbos de tempo, instruções de confecção, e muito mais. Uma vez que o leitor tenha recebido os dados da etiqueta, essa informação é reencaminhada para o controlador através de uma *interface* de rede padrão, tal como uma rede interna LAN (*local area network* ou rede local) ou mesmo a Internet.

Figura 6 – Sistema Básico RFID.



Fonte: Autoria Própria (2023).

O controlador pode então utilizar essa informação para uma variedade de fins. Por exemplo, o responsável pelo tratamento pode utilizar os dados para simplesmente inventariar o objeto numa base de dados, ou poderia utilizar a informação para redirecionar o objeto para um sistema de correias transportadoras (HUNT, 2006).

Um sistema RFID pode consistir em muitos leitores espalhados por um armazém ou ao longo de uma linha de montagem. No entanto, estes leitores poderiam ser ligados em rede a um único controlador. Da mesma forma, um único leitor pode se comunicar com mais do que uma etiqueta simultaneamente. Neste estado da tecnologia, a comunicação simultânea a uma taxa de 1.000 etiquetas por segundo é possível, com uma precisão que excede 98 por cento (HUNT, 2006).

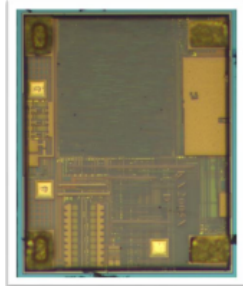
2.3.2 Kiloway KX2005X

O CHIP Kiloway KX2005X-S UHF, apresentado na Figura 7, adota a tecnologia X-RFID® original da Kiloway, que utiliza XLPM (memória permanente de super baixa potência) como memória. A memória XLPM tem a memória física não apagáveis, funções à prova de manipulação com as vantagens de alta fiabilidade, alta segurança, baixo custo, e longo tempo de armazenamento de dados (mais de 100 anos). É utilizado um algoritmo anti-colisão flexível e eficiente para assegurar a rápida identificação de múltiplas etiquetas e possui uma sensibilidade de -23 dBm (KILOWAY, 2013).

2.3.3 Estrutura do Chip KX2005X-S

O chip KX2005X-S inclui três módulos, como mostrado na Figura 1: módulo analógico RF, módulo de banda base digital e memória. O módulo de radiofrequência analógica inclui um módulo de geração de *clock*, relé de potência, retificador, demodulador e modulador. O retificador fornece uma saída de energia estável para o chip, e o demodulador demodula o sinal

Figura 7 – Kiloway 2005X



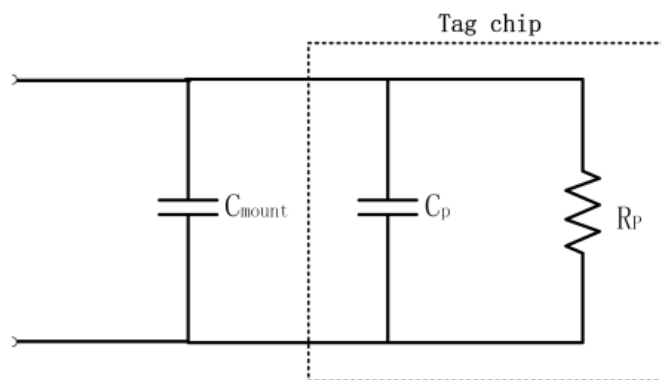
Fonte: Autoria Própria (2023).

enviado pelo leitor e o fornece ao módulo do leitor digital de banda de base. O módulo de banda de base digital analisa os comandos enviados pelo leitor, inicia o módulo interno de máquina de estado para executar estes comandos um a um, e completa operações como a leitura e escrevendo para a memória.

2.3.4 Impedância Equivalente do CHIP

A impedância equivalente do circuito do CHIP UHF KX2005X, Figura 8 é calculada pelo equivalente externo de resistência e capacitância.

Figura 8 – Circuito equivalente chip RFID



Fonte: Adaptado de Kiloway (2013).

O capacitor C_{mount} ou Capacitor de montagem é um valor dado á capacitância parasita criada ao montar o chip na antena, esse valor é pode ser calculado mas apenas em condições extremamente favoráveis já que o dielétrico entre o chip e a antena será o epóxi usado para fixar o CHIP na antena e realizar o contato elétrico utilizando nanoesferas metálicas para que não haja curto circuito entre os terminais da antena. Já o valores " C_p " e " R_p " podem ser encontrados no *datasheet* do chip demonstrada na Tabela 2.

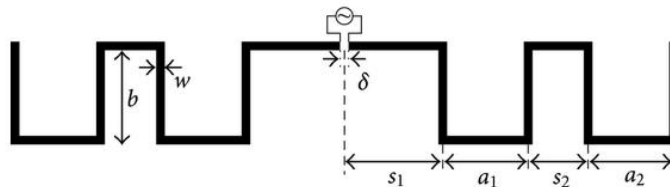
Tabela 2 – Características Eletrônicas do Chip

Parâmetro	Impedância	Valor	Unidade
Capacitância		0.57	pF
Resistência		4520	Ω

Fonte: Adaptado de Kiloway (2013).

2.3.5 Antenas de linha dobrada

As antenas de linha dobrada de micro-fita, apresentada na Figura 9, mais conhecidas como *Microstrip Meander Line Antennas (MMLAs)* são uma topologia de antenas. A ideia inicial foi proposta por (RASHED; TAI, 1991) em artigo intitulado “*A New Class of Resonant Antennas*” para o caso de antenas convencionais de fio, onde se buscou uma miniaturização de uma antena monopolo filamentar dobrando-a em ângulos de 90° para obter a frequência de ressonância desejada.

Figura 9 – Modelo Básico de uma MMLA

Fonte: Adaptado de Travassos (2012).

Uma MMLA encolhe o comprimento elétrico de um monopolo ou dipolo convencional SLDA (do inglês *Single Line Dipole Antenna* ou antena dipolo de linha única) dobrando este comprimento para frente e para trás em ângulos retos formando múltiplas voltas.

Esta topologia é desejável quando se busca a ressonância em frequências baixas, pois reduzirá o espaço físico ocupado pela antena.

São amplamente utilizadas em dispositivos transmissores e receptores miniaturizados bem como em etiquetas de RFID. São de fácil integração com o circuito impresso existente e são flexíveis quanto ao seu formato (OLAODE; PALMER; JOINES, 2012).

Em (MCCORMICK, 2015) apresenta o circuito equivalente para a antena dipolo serpenteada (do inglês *Meander*). É uma versão modificada do modelo de circuito equivalente do dipolo bem conhecido.

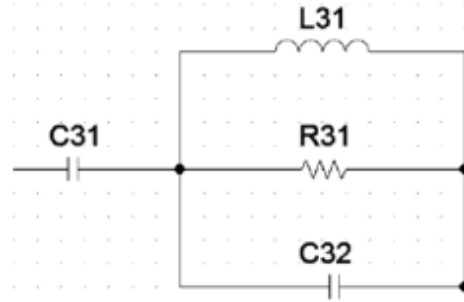
A Figura 10 mostra o modelo de circuito padrão para a antena dipolo de linha reta, que será usado para a antena dipolo de linha serpenteada (MMLA).

A Figura 11 mostra um dos dois braços da MMLA com 3 serpentes. Isso é importante notar, pois as equações dependem do número de serpentes.

Onde:

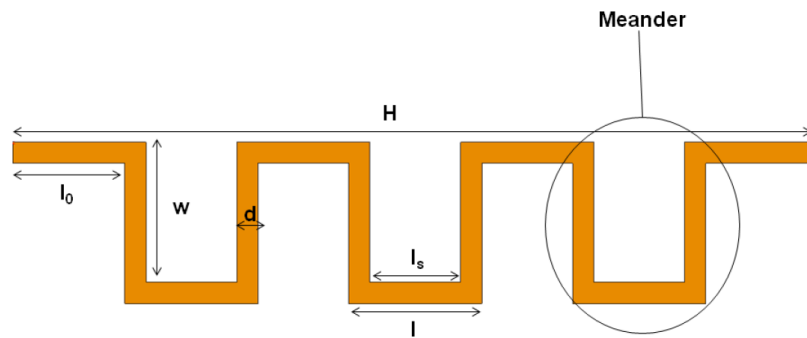
$$C_{31} = \frac{12.0674 \cdot (L - 2wN)}{\log\left(\frac{2 \cdot L - 2wN}{a}\right) - 0.7245} \text{ pF} \quad (1)$$

Figura 10 – Circuito equivalente de uma MMLA.



Fonte: Adaptado de McCormick (2015).

Figura 11 – Braço de Dipolo Serpenteado.



Fonte: Adaptado de McCormick (2015).

$$C_{32} = 2(L - 2wN) \left\{ \frac{0.89075}{\left(\log \frac{2(L-2wN)}{a} \right)^{0.8006} - 0.861} - 0.02541 \right\} pF \quad (2)$$

$$L_{31} = 0.2L \left\{ \left(1.4813 \log \left(\frac{2L}{a} \right) \right)^{1.012} - 0.6188 \right\} \mu H \quad (3)$$

$$C_m = \left\{ \frac{\pi \epsilon_0 w}{\ln \left(\frac{l_s}{a} + \sqrt{\left(\frac{l_s}{a} \right)^2 - 1} \right)} \right\} F \quad (4)$$

$$f_0 = \left\{ \frac{1}{2\pi \sqrt{L_{31} \left(C_{31} + C_{32} + \frac{C_m}{2(2N-1)} \right)}} \right\} Hz \quad (5)$$

As equações 1-3 são as equações do circuito equivalente SLDA adaptadas para um MMLA, onde L é o comprimento total do fio, w é a largura da curva, N é o número de curvas e a é o raio equivalente do fio para uma largura de traço d ($a = d/4$). A equação 4 determina a capacitância mútua entre as seções adjacentes do fio, onde l_s é o espaçamento entre os 2 fios paralelos que formam uma curva. A equação 5 é a frequência ressonante estimada para o

MMLA. Deve-se notar que essas equações são razoavelmente precisas para um MMLA cujo número de curvas esteja entre 1 e 6, com uma precisão de menos de 15% de erro, proporcionando um bom ponto de partida para o projeto do MMLA (MCCORMICK, 2015).

2.4 Fotolitografia

Dentre os métodos de produção de PCIs (Placas de Circuito Impressos) que se enquadram nas necessidades indicadas, o método denominado de fotolitografia oferece um caráter mais profissional à fabricação de PCIs experimentais, sendo um dos poucos processos utilizados na indústria apto a ser reproduzido em pequena escala, possibilitando a elaboração de placas com trilhas mais finas e com melhor acabamento, alta reprodutibilidade e possibilidade de produção em pequena e larga escala (LOPES, 2017).

Esta técnica, necessita de corrosão química, porém, para a realização da transferência do layout à placa faz-se uso da exposição da mesma à luz ultravioleta (UV) por meio da aplicação de um fotolito sobre uma camada de polímero fotossensível (CUSTODIO, 2014).

Para execução de tal técnica faz-se necessário, em suma, uma câmara de exposição ultravioleta (UV) para a transferência do padrão do circuito do fotolito para o polímero fotossensível. Apesar de não ser um equipamento de altíssima complexidade os seus exemplares disponíveis no mercado possuem preços bastantes elevados. (CUSTODIO, 2014).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento da antena, a metodologia experimental foi utilizada, afinal, envolve uma abordagem sistemática para projetar, construir e testar antenas visando atender requisitos específicos de desempenho e aplicação. Tais como:

1. Definição dos requisitos: Como a faixa de frequência de operação, a largura de banda, o ganho, a polarização, o tipo de aplicação e as restrições de espaço. Isso ajudará a orientar o projeto da antena.
2. Pesquisa e revisão bibliográfica: Pesquisa sobre antenas UHF RFID, incluindo estudos acadêmicos, artigos técnicos, padrões e especificações relevantes.
3. Simulação e modelagem: Para projetar a geometria da antena, otimizar suas dimensões e analisar o desempenho teórico. As simulações podem ajudar a ajustar os parâmetros da antena para obter um desempenho desejado.
4. Prototipagem e fabricação: Com base no projeto da antena otimizado por simulação, A criação de um protótipo físico, utilizando a técnica de fotolitografia.
5. Medição e teste: Utilizando uma câmara anecoica para medir os parâmetros da antena, como: ganho, eficiência, radiação e largura de banda. Os resultados dos testes podem ser comparados com as simulações teóricas para validar e ajustar o projeto da antena.
6. Otimização e iteração: Com base nos resultados dos testes, ajuste o projeto da antena, se necessário. Realize iterações adicionais de simulação, prototipagem e teste para aprimorar o desempenho da antena em relação aos requisitos definidos.

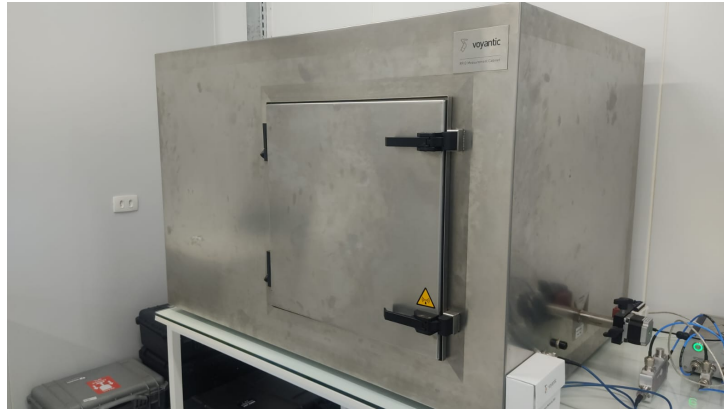
A topologia que será abordada é a MMLA. Essa topologia será ajustada para que os parâmetros da antena estejam em conformidade com o chip Kiloway, garantindo o casamento de impedâncias. De forma que, sua frequência de ressonância seja de 915 MHz, o que está de acordo com as regulamentações da Anatel para a utilização de etiquetas RFID no Brasil (ANATEL, 2017).

Após os cálculos e simulações realizados no *software HFSS*, a antena será prototipada utilizando subtração química sobre um substrato de cobre para poder ser ajustado manualmente caso necessário, o chip será montado utilizando um *Stap*. Uma análise será feita utilizando uma câmara anecoica para obtenção do alcance de leitura teórico da antena e obtenção das curvas de *Threshold*, *Backscatter* e *Orientation*. Com o resultado do ensaio, será possível analisar o desempenho da antena em meios como ar, vidro e plásticos.

3.0.1 Análises obtidas por meio da câmara anecoica

:

Figura 12 – Câmara Anecoica Voyantic.



Fonte: Autoria Própria (2023).

Threshold — O ensaio *Threshold* é projetado para determinar o nível mínimo de sinal de rádio que um leitor RFID precisa enviar para uma etiqueta RFID para que ela possa responder de maneira confiável. Isso é importante porque se o sinal de rádio do leitor não tiver energia o suficiente, a etiqueta pode não ser lida corretamente ou pode levar mais tempo para ser lida, o que pode afetar a eficiência do sistema de RFID como um todo.

O ensaio *Threshold* é realizado posicionando uma etiqueta RFID em uma determinada posição e variando o nível de potência do sinal de rádio enviado pelo leitor RFID até que a etiqueta não possa mais ser lida com confiabilidade.

Backscatter — Backscatter é um conceito fundamental na tecnologia de RFID (identificação por radiofrequência). Ele se refere ao processo pelo qual uma tag RFID responde a uma solicitação de um leitor RFID, refletindo uma parte do sinal de rádio que recebe de volta para o leitor.

O processo de backscatter ocorre quando a tag RFID é energizada pelo campo de rádio emitido pelo leitor RFID. A tag usa essa energia para transmitir uma resposta ao leitor, modulando o sinal de rádio refletido. O sinal modulado contém informações que a tag está programada para transmitir, como um número de série ou um código de produto.

A tecnologia de backscatter é especialmente útil em aplicações de RFID porque permite que as tags RFID sejam passivas e sem bateria, o que significa que elas não precisam de uma fonte de alimentação externa para funcionar. Em vez disso, a energia necessária para transmitir a resposta da tag é fornecida pelo próprio sinal de rádio do leitor.

Diretividade — O ensaio de orientação é uma junção dos dois ensaios citados anteriormente. Ele mede o desempenho da etiqueta em várias posições. 180°, 45°, 90°, 270° e intermitentes. A etiqueta é rotacionada na câmara anecoica e uma análise de *Threshold* é realizada enquanto isso resultando em uma curva de desempenho para todas as posições possíveis da etiqueta.

A Câmara anecoica: uma câmara anecoica (sem eco) é um equipamento projetado para conter reflexões, tanto de ondas sonoras quanto eletromagnéticas. Elas também são isoladas de

fontes externas de ruído. A combinação de ambos os aspectos significam que elas simulam um espaço aberto de dimensão infinita, sendo uma característica útil quando influências externas podem interferir nos resultados. Ensaios RFID são extremamente necessários, pois o uso de altas frequências pode levar a distorções nos resultados devido a diversos fatores.

3.1 Prototipação utilizando corrosão

Para realizar a prototipação, será utilizado a técnica de fotolitografia. O método de utilizar ácidos que reagem com um metal para remover determinadas partes desejadas de um dielétrico formando uma geometria é uma técnica muito conhecida no mundo da eletrônica, amplamente usada para corrosão de Placas de fenolite, o fenolite é composto de papel (celulose) prensado com resina fenólica, uma placa desse material normalmente leva uma camada fina de cobre, cerca de 1 oz (37,8 g). Esse cobre pode ser removido por meio do processo de corrosão ou usinagem.

O percloroeto de ferro (FeCl_3) é uma substância química de coloração laranja a marrom-preto classificada quimicamente como sal e corrosiva para maioria dos metais. É utilizada frequentemente dissolvida em solução aquosa para fabricação manual de placas de circuito impresso atuando na corrosão do metal cobre.

3.2 Simulações

Todas as simulações foram feitas utilizando o software comercial HFSS® que é um programa desenvolvido pela Ansys® para a simulação de campos eletromagnéticos em estruturas em geral (ANSYS, 1990).

A Figura 13 apresenta uma variedade de solucionadores e módulos para analisar o comportamento elétrico de componentes em frequências elevadas disponíveis no software, como antenas, dispositivos sem fio, telefones celulares, filtros, entre outros. Além disso, o software também é capaz de analisar o comportamento elétrico de componentes em altas velocidades, como circuitos integrados, placas de circuito impresso e conectores.

Com essa gama de soluções, o software é uma ferramenta importante para engenheiros que trabalham com projetos em altas frequências, permitindo a simulação e otimização de componentes e sistemas complexos.

Para melhorar o alcance de leitura, foram realizadas análises paramétricas e otimizações, todas as quais verificaram a condição de convergência da simulação.

A convergência da simulação é um critério importante na análise de antenas e outros dispositivos por meio de simulações eletromagnéticas. Refere-se à condição em que os resultados obtidos na simulação não sofrem alterações significativas à medida que o número de iterações aumenta.

Figura 13 – Solucionadores e opções do software HFSS



Fonte: Adaptado de Ferreira (2021).

Em outras palavras, quando uma simulação converge, significa que os resultados obtidos atingem um estado estável e consistente, fornecendo uma representação confiável do comportamento do dispositivo em estudo. Isso é crucial para garantir a precisão e a confiabilidade dos resultados da simulação.

Durante as análises paramétricas, diferentes parâmetros foram variados, como a geometria da antena, a posição dos elementos irradiantes e os materiais utilizados. Essas variações permitiram explorar diversas configurações e identificar as melhores combinações para maximizar o alcance de leitura.

Com base nos resultados das análises paramétricas, foram realizadas otimizações para ajustar os parâmetros da antena de forma a obter um desempenho ideal.

Como o cálculo direto do alcance de leitura não é no software HFSS devido à ausência da equação correspondente. Por essa razão, foi necessário implementar a fórmula de Friis no software, para permitir o cálculo do alcance de leitura. A partir desse ponto, as simulações foram executadas no domínio do tempo e na frequência de 915 MHz.

A fórmula de Friis, também conhecida como equação de Friis ou lei de Friis, é uma equação utilizada na engenharia de telecomunicações para calcular a perda de potência entre um transmissor e um receptor. A fórmula de Friis é apresentada na equação 6:

$$P_r = P_t \cdot G_t \cdot G_r \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (6)$$

Em que:

P_r é a potência recebida pelo receptor (em watts);

P_t é a potência transmitida pelo transmissor (em watts);

G_t é o ganho de transmissão da antena do transmissor (em dBi);

G_r é o ganho de recepção da antena do receptor (em dBi);

λ é o comprimento de onda do sinal (em metros);

d é a distância entre as antenas (em metros).

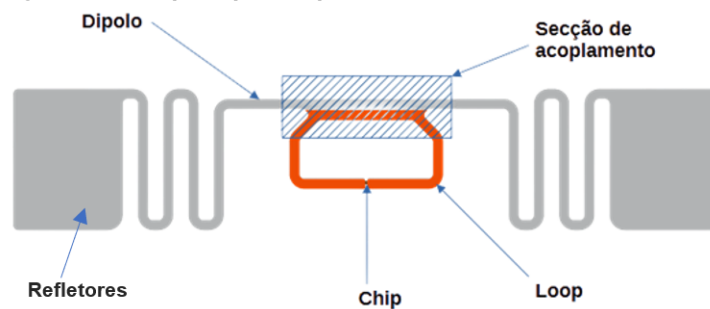
Para simplificar a simulação será considerado antenas de ganho igual a 1 e que a distância entre o transmissor e o receptor é grande o suficiente para que a perda de potência devido ao espalhamento seja desprezível. Sob essas condições, a fórmula de Friis pode ser simplificada para a equação 7:

$$d = \frac{\lambda}{4\pi} \cdot \sqrt{\frac{P_t}{P_r}} \quad (7)$$

3.3 Caracterização da etiqueta

A maioria das etiquetas passivas UHF RFID planares disponíveis no mercado, para uso geral, contém dobras em sua estrutura, conhecidos como antenas com *meanders*. A Figura 14 apresenta um modelo de uma etiqueta comum para objetos não metálicos, destacando as suas partes constituintes. Geralmente, essas etiquetas são compostas por quatro componentes principais: a seção de acoplamento, o circuito integrado (CI), o dipolo e o *loop* indutor. Essa estrutura é comum em etiquetas RFID planares para uso geral e permite que essas etiquetas funcionem de forma eficiente e confiável. A compreensão desses componentes e sua função é essencial para o desenvolvimento e otimização de etiquetas RFID.

Figura 14 – Etiqueta para superfícies não metálicas(Modelo E62)



Fonte: Adaptado de Impinj (2017).

O dipolo é o componente físico de campo distante que possibilita a comunicação de longa distância entre o leitor e a etiqueta (IMPINJ, 2017).

A seção de acoplamento transfere energia entre o dipolo e o circuito indutor (IMPINJ, 2017).

O circuito indutor (loop) ressoa com a capacitância do chip da etiqueta e fornece energia ao chip (IMPINJ, 2017).

O chip da etiqueta é o componente central da etiqueta RFID, que fornece as principais capacidades do RAIN RFID (IMPINJ, 2017).

Os refletores têm a função de melhorar a direcionalidade da antena, aumentando o ganho direcional e a eficiência global do sistema, o que contribui para uma melhor performance de leitura e alcance da etiqueta RFID (IMPINJ, 2017).

4 RESULTADOS

4.1 Caracterização do Loop

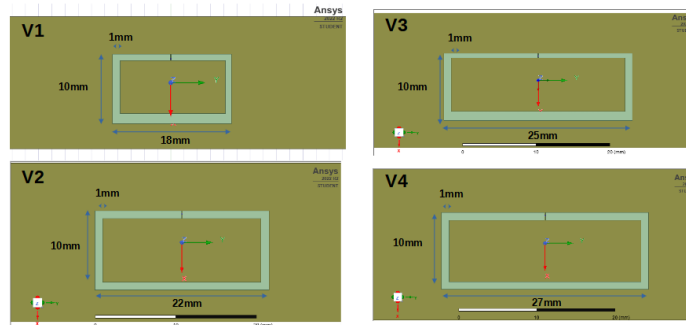
O projeto e dimensionamento do *loop* de uma antena UHF RFID envolve a consideração de diversos fatores, como o tipo de material da antena, o tamanho e formato do *loop*, a frequência de operação do sistema, entre outros.

Um projeto bem-sucedido do *loop* da antena UHF RFID é fundamental para garantir a eficiência do sistema.

Devido às limitações impostas sobre o projeto (antena com 70 mm de comprimento e 14 mm de altura) e como o *loop* pode tomar qualquer forma. Tais como: circular, retangular, hexagonal, etc. Para este projeto será feito o dimensional de um *loop* de formato retangular, pela conveniência de ajustes.

Utilizando a antena E62 da Impinj como referência demonstrada na figura 14. A altura do loop foi limitada a 10 mm e sua espessura de trilha em 1 mm. Assim, é possível obter a melhor correspondência apenas fazendo alterações na largura para o ajuste de frequência como demonstrado na figura 15.

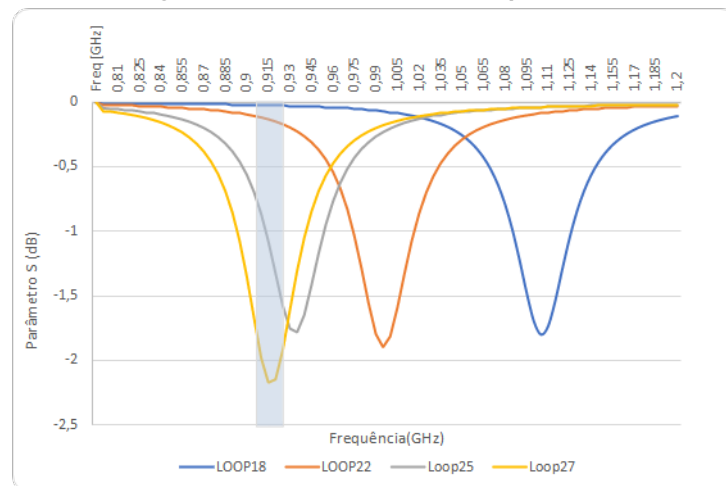
Figura 15 – Ajustes do Loop



Fonte: Autoria Própria (2023).

Utilizando o software Ansys HFSS é possível realizar simulações com diferentes tamanhos de *loop* como demonstrado na Figura 15 e encontrar o melhor tamanho para este projeto.

Figura 16 – Parâmetro S dos Loops - HFSS



Fonte: Autoria Própria (2023).

Nota-se pela Figura 16 que o melhor loop para este projeto foi o de 27 mm de largura, pois o mesmo obteve a menor perda de retorno, menor que -2 dB, em 915 MHz.

4.2 Caracterização do Meander

Para determinar o comprimento total de um dipolo de meia onda que irá ressonar em uma determinada frequência, utiliza-se a fórmula 8.

$$L = \frac{\lambda}{2} \quad (8)$$

O comprimento total do dipolo em metros é igual ao comprimento de onda em metros dividido por 2. É importante lembrar que essa fórmula pressupõe que o dipolo esteja em espaço livre e não esteja próximo a nenhum objeto que possa afetar sua ressonância.

Para calcular o comprimento de onda, é aplicada a fórmula. 9:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (9)$$

onde:

λ é o comprimento de onda em metros;

c é a velocidade da luz, aproximadamente 3×10^8 metros por segundo;

f é a frequência em hertz.

Ao substituímos os valores, é possível obter:

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{915 \times 10^6 \text{ Hz}} \approx 0,327 \text{ m} \quad (10)$$

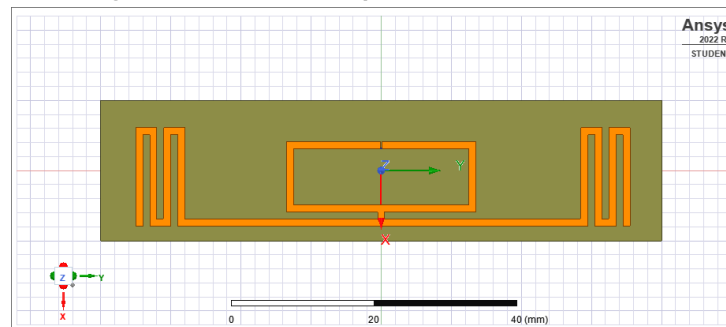
Agora é possível calcular o comprimento total do dipolo utilizando a fórmula 8. Ao substituir o valor de λ , obtém-se:

$$L = \frac{0,327 \text{ m}}{2} = 0,1635 \text{ m} \quad (11)$$

Portanto, o comprimento total do dipolo que ressoa em 915 MHz é de aproximadamente 0,1635 metros, ou 16,35 centímetros. Se o dipolo estiver próximo a objetos ou materiais que afetem a ressonância, pode ser necessário ajustar o comprimento total para alcançar a frequência desejada.

Para solucionar a restrição do tamanho máximo da etiqueta, que é de 7 centímetros, são utilizados elementos chamados *meanders*. Isso envolve dobrar o dipolo de maneira a reduzir seu comprimento físico. No entanto, é importante lembrar que *meanders* muito próximos podem criar capacitâncias parasitas na antena, o que deve ser levado em consideração durante o projeto.

Figura 17 – Primeira Proposta de Modelo de antena

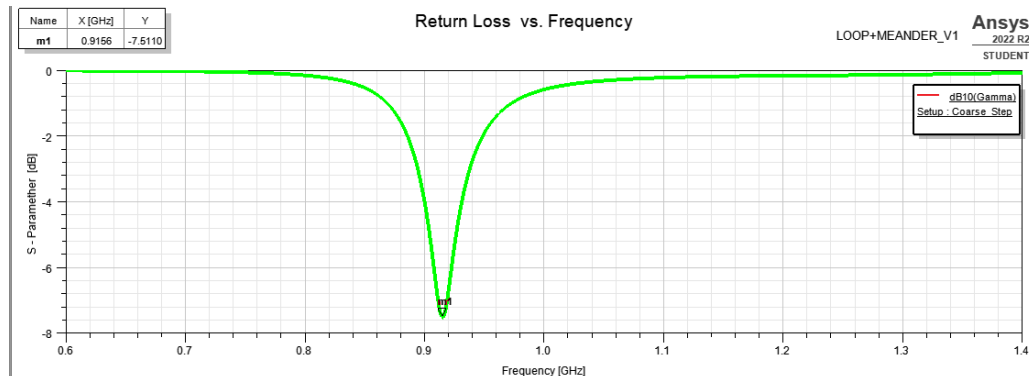


Fonte: Autoria Própria (2023).

A simulação do modelo da Figura 17 foi realizada nos mesmos parâmetros utilizados para simular os *Loops*.

É possível analisar se os cálculos estão corretos simulando a perda de retorno da antena proposta.

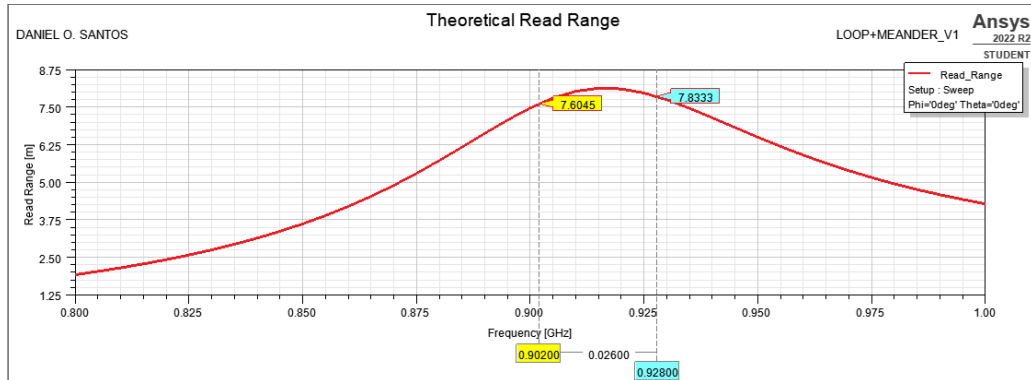
Figura 18 – Perda de Retorno - Antena V1



Fonte: Autoria Própria (2023).

Pode-se observar pela Figura 18 que menor perda por retorno da antena ocorre em 915 MHz, o que coincide com os cálculos realizados. Agora é necessário verificar o quão distante essa antena pode ser lida por meio da simulação de seu alcance de leitura teórico.

Figura 19 – Alcance Teórico da antena proposta

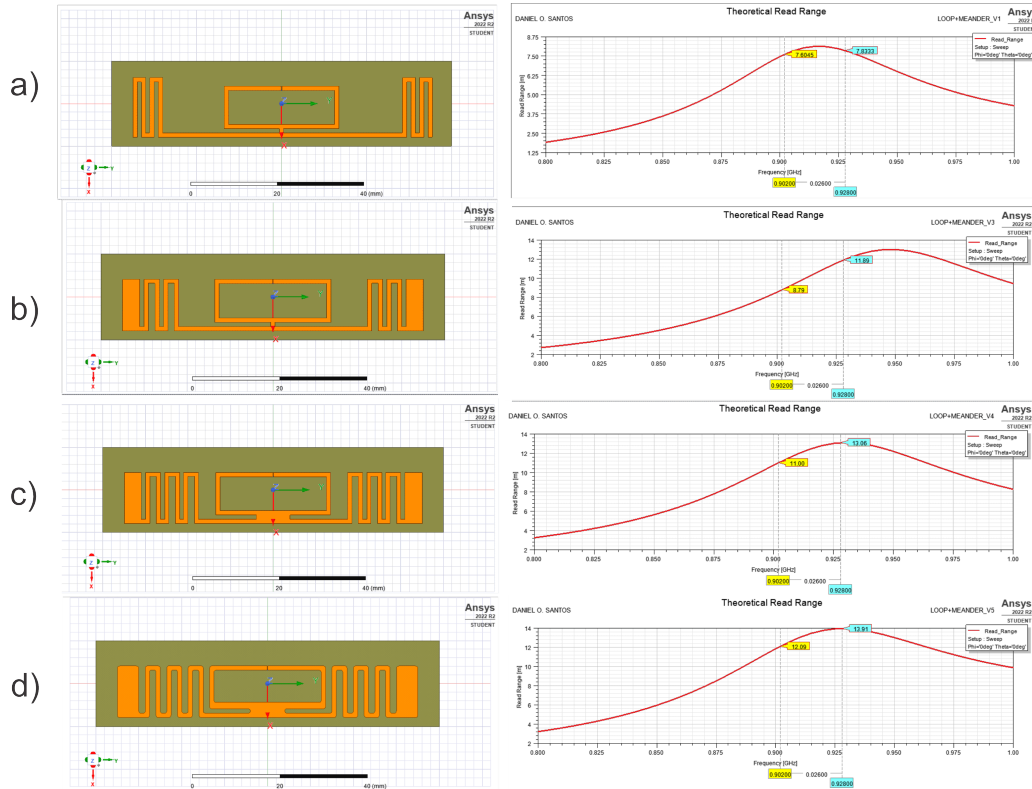


Fonte: Autoria Própria (2023).

Pode-se notar pela Figura 19 que o alcance esperado não foi satisfatório, uma vez que esperava-se alcançar pelo menos 10 m de distância leitura. Além disso, essa simulação foi realizada em condições ideais, como se a etiqueta estivesse suspensa no ar. Em seguida, foi adicionado um pedaço de papelão na simulação, considerando sua espessura de 3 mm que deve influenciar no comportamento da etiqueta. Com isso, será possível realizar os devidos ajustes na antena.

4.3 Melhorias no design

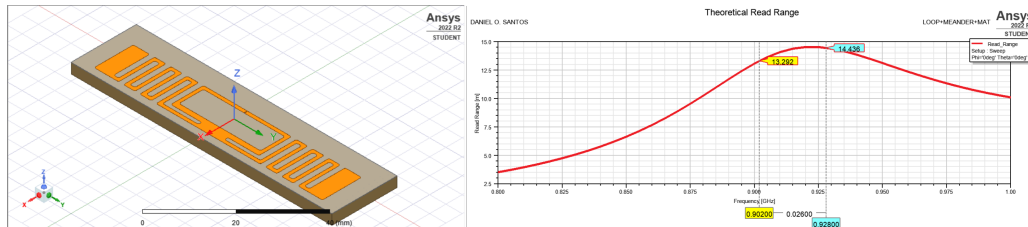
Figura 20 – Progressão do design da antena



Fonte: Autoria Própria (2023).

Depois de definir um desenho (Figura 20-d) para a antena que teoricamente atenda aos requisitos do projeto, é necessário garantir que a antena continue a se comportar de maneira desejada em seu respectivo material. Para isso, pode-se adicionar uma camada de material à simulação neste. Neste caso, 3 mm de papelão.

Figura 21 – Simulação Papelão

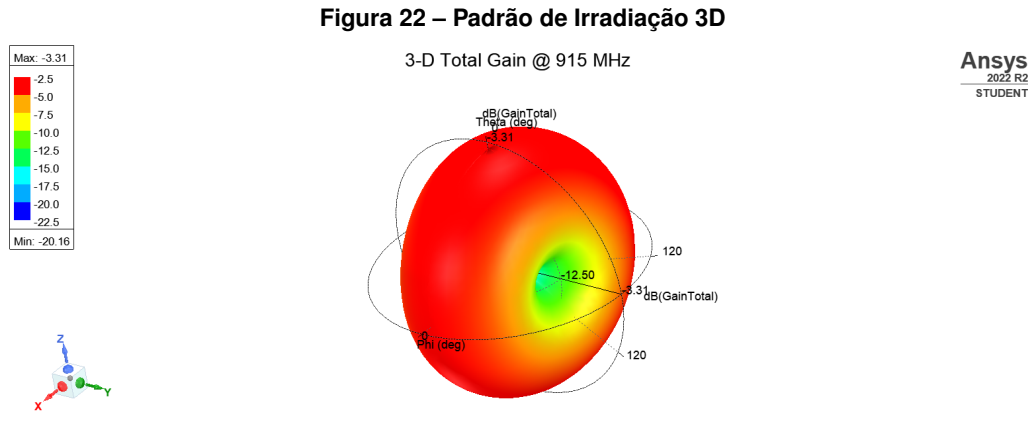


Fonte: Autoria Própria (2023).

Pelo gráfico apresentada na Figura 21, é possível observar a influência do material sobre a antena e verificar que, mesmo assim, o seu comportamento permanece dentro do esperado, alcançando teoricamente de 12 a 13 metros de alcance de leitura com leitores fixos.

Para validar a eficácia do design da antena, é fundamental que sejam realizados testes por meio da prototipação. A análise física do comportamento da antena em um ambiente

real permitirá avaliar aspectos que não podem ser simulados apenas por meio de modelos teóricos, garantindo que a antena desempenhe sua função de forma adequada. Dessa forma, a prototipação se torna uma etapa crucial no processo de desenvolvimento da antena.



Fonte: Autoria Própria (2023).

O resultado da simulação do padrão de irradiação 3D da antena dipolo RFID, realizado no software de simulação HFSS como demonstrado na Figura 22. Com essa simulação, é possível obter informações detalhadas sobre a intensidade e a direção do campo elétrico radiado pela antena em diferentes frequências, bem como a distribuição de energia em diferentes ângulos em relação ao plano da antena. Esses dados são essenciais para otimizar o projeto e a fabricação da antena, garantindo que ela seja capaz de transmitir e receber sinais RFID de forma eficiente e confiável em diferentes ambientes e aplicações.

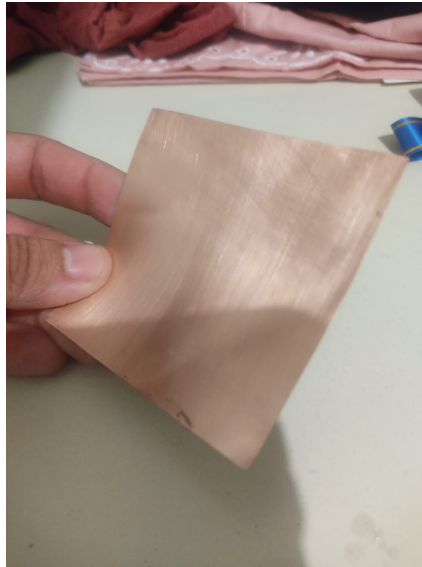
4.4 Prototipação

Para a realização da prototipação da antena, optou-se pelo uso da técnica de fotolitografia, visto que ela proporciona maior precisão em relação à técnica de prototipação por termo transferência e é uma alternativa mais econômica em comparação com a prototipação utilizando equipamentos como laser ou Máquinas CNC (Comando Numérico Computadorizado) adaptadas para prototipação de antenas. Dessa forma, a escolha da técnica de fotolitografia se mostrou como uma opção vantajosa em termos de qualidade e custo-benefício na prototipação da antena.

4.4.1 Preparação da placa de circuito impresso flexível:

A placa de circuito impresso flexível é comumente fabricada com cobre, revestido por uma camada de óxido para proteção contra corrosão. Para a preparação da superfície e aplicação do foto-resistente, é necessário remover essa camada de óxido por meio de lixamento, a fim de deixar a superfície limpa e livre de impurezas, como ilustrado na Figura 23.

Figura 23 – Placa de Circuito impresso Flexível Lixada



Fonte: Autoria Própria (2023).

4.4.2 Aplicação do foto-resistente:

A camada de foto-resistente é aplicada à placa de circuito impresso para proteger as áreas onde as trilhas de circuito não serão impressas. O foto-resistente é geralmente feito de uma resina que contém um fotoiniciador. Quando exposto à luz UV, o fotoiniciador gera radicais livres que iniciam uma reação de polimerização na resina. A equação química para a polimerização da resina de foto-resistente está demonstrada na Equação 12 :



Figura 24 – Aplicação do fotoresiste



Fonte: Autoria Própria (2023).

Para garantir a uniformidade do foto-resistente sobre a placa flexível (Figura 24), é necessário remover o excesso do material. Para isso, fixou-se a placa em uma micro-retífica utilizando cola quente, para que pudesse ser centrifugada de maneira adequada

4.4.3 Exposição à luz UV:

A placa de circuito impresso é então exposta à luz UV através da máscara, que bloqueia a luz em certas áreas e permite que ela passe através de outras. As áreas expostas à luz UV iniciam a polimerização da resina de foto-resistente, enquanto as áreas não expostas permanecem inalteradas.

Figura 25 – Exposição a luz UV



Fonte: Autoria Própria (2023).

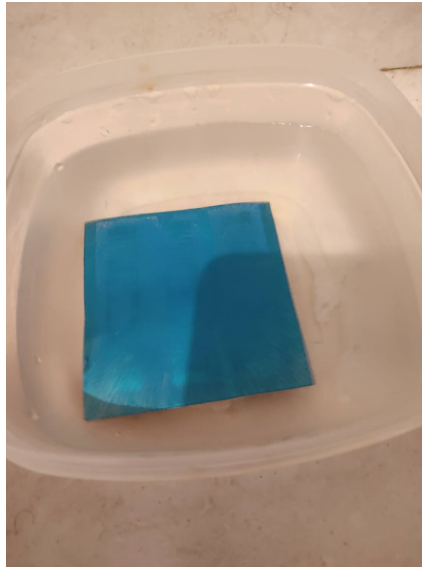
4.4.4 Revelação:

Depois que a placa de circuito impresso é exposta à luz UV, como demonstrado na Figura 25, ela é imersa em um solvente, demonstrado na Figura 26. A barrilha é frequentemente utilizada como revelador neste processo, pois é capaz de remover a camada de óxido da superfície do substrato que não foi exposta à luz.

O processo de revelação começa com a imersão da placa de circuito impresso em uma solução de barrilha. A barrilha reage com a camada de óxido, removendo-a e expondo o substrato que foi exposto à luz. A barrilha também pode remover a camada de fotolito que foi exposta à luz, criando assim o padrão final desejado na superfície do substrato.

Após a imersão na solução de barrilha, a placa de circuito impresso é enxaguada com água corrente para remover qualquer resíduo de barrilha e fotolito.

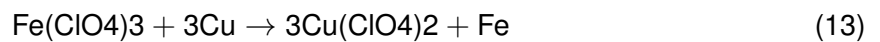
A proporção utilizada para este projeto foi 500 ml de água e uma colher de sopa de barrilha.

Figura 26 – Processo de revelação

Fonte: Autoria Própria (2023).

4.4.5 Corrosão

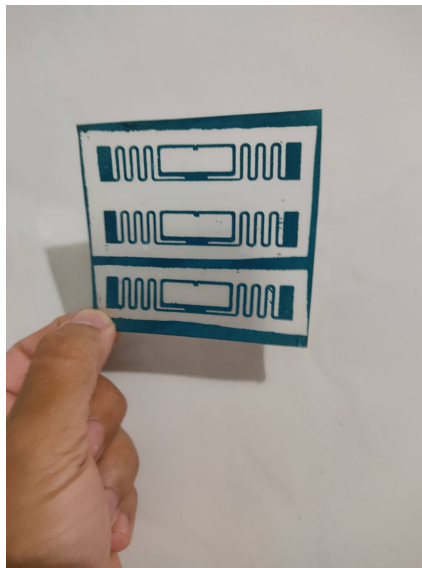
Após a etapa de revelação, a placa de circuito impresso é corroída usando um agente químico, como uma solução de persulfato de amônio ou perclorato de ferro. Essas soluções são altamente oxidantes e atacam o cobre não protegido pela camada de foto-resistente, corroendo-o e criando as trilhas de circuito impresso, demonstrado na Equação 13



Para este projeto foi utilizado um solução líquida comercial de percloroeto de ferro, Figura 27.

Figura 27 – Processo de Corrosão

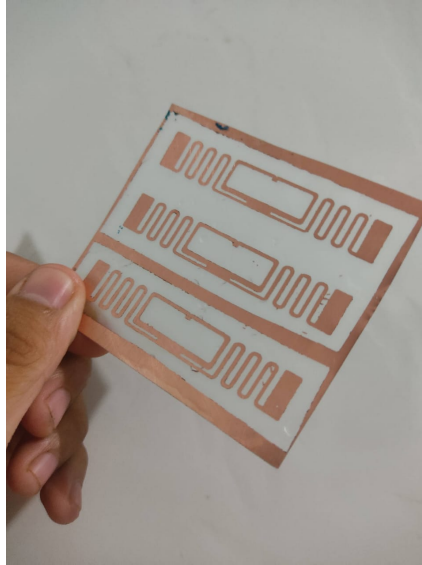
Fonte: Autoria Própria (2023).

Figura 28 – Placa Corroída

Fonte: Autoria Própria (2023).

Depois que a corrosão é concluída (Figura 28), a placa de circuito impresso é lavada e o foto-resistente restante é removido com um solvente. Para este projeto, foi utilizada uma solução composta por água e soda cáustica para concluir a etapa de revelação. A Figura 29 demonstra o resultado final do processo de prototipagem.

Figura 29 – Protótipos Finalizados

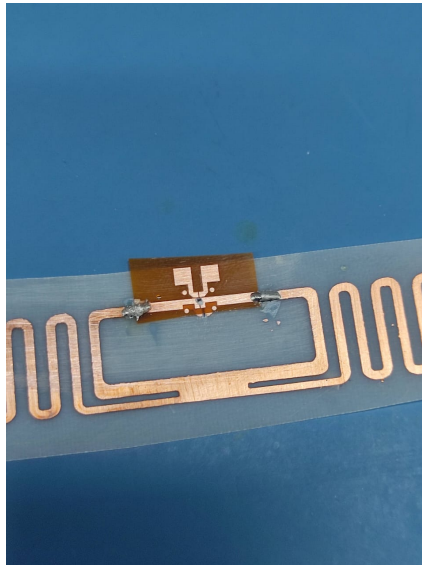


Fonte: Autoria Própria (2023).

4.4.6 Montagem do Chip

Para realizar a montagem do chip da antena, Figura 30, foi utilizado um *Strap* com o chip e soldado na antena.

Figura 30 – Montagem do Chip na antena



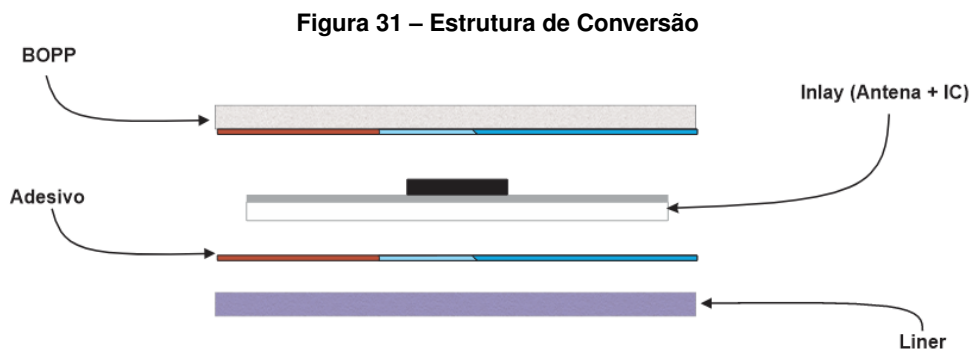
Fonte: Autoria Própria (2023).

4.4.7 Conversão:

É nomeado como processo de conversão de uma etiqueta adesiva quando o *inlay* (Antena + CI) é montado entre uma duas camadas de materiais o frontal e o *liner*, esta estrutura

está demonstrada na Figura 31. o frontal pode ser composto por papel ou um material plástico, neste projeto foi utilizado BOPP. O BOPP (sigla em inglês para *Biaxially Oriented Polypropylene*) é um filme plástico produzido a partir do polipropileno. O processo de fabricação do BOPP envolve a orientação do material em duas direções, o que lhe confere alta resistência mecânica, transparência, brilho e boa barreira contra gases, vapor de água e gordura. O BOPP é amplamente utilizado na indústria de embalagens flexíveis, como sacos, etiquetas, filmes, fitas adesivas e envoltórios. Além disso, o BOPP é um material reciclável, o que o torna uma opção sustentável para diversas aplicações.

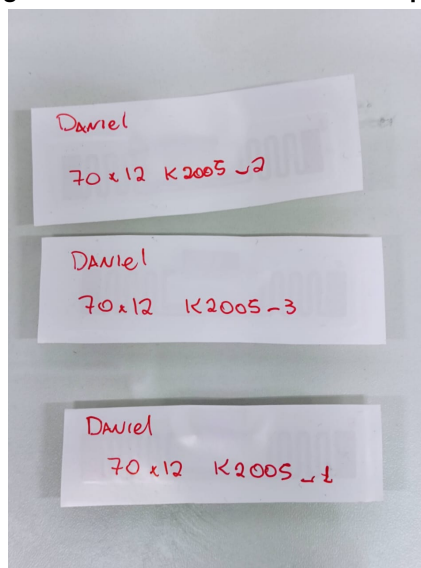
O *liner*, muitas vezes conhecido como “protetor” do rótulo ou etiqueta, apesar de muitas vezes não ser visto pelo consumidor final, é uma parte essencial da construção autoadesiva. Geralmente consiste numa fina camada de silicone aplicada num substrato de filme ou papel. Representa a parte do autoadesivo que é descartada durante o processo de rotulagem, “destacando-se” do frontal e permitindo que a aplicação aconteça na embalagem ou substrato, que pode ser de forma manual ou automática (DENNISON, 2020).



Fonte: Autoria Própria (2023).

O resultado final da conversão está demonstrada na Figura 32

Figura 32 – Antena Convertida em Etiqueta

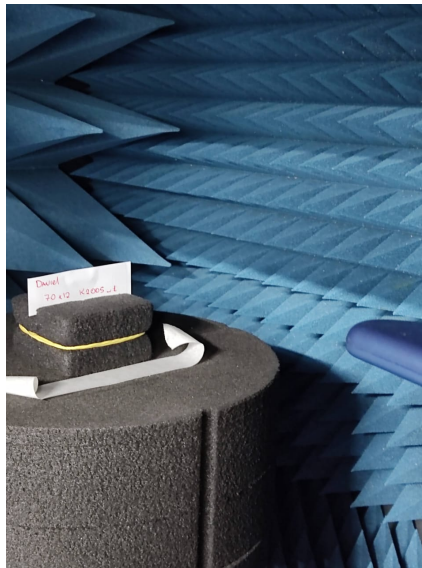


Fonte: Autoria Própria (2023).

4.5 Obtenção da Curva Característica

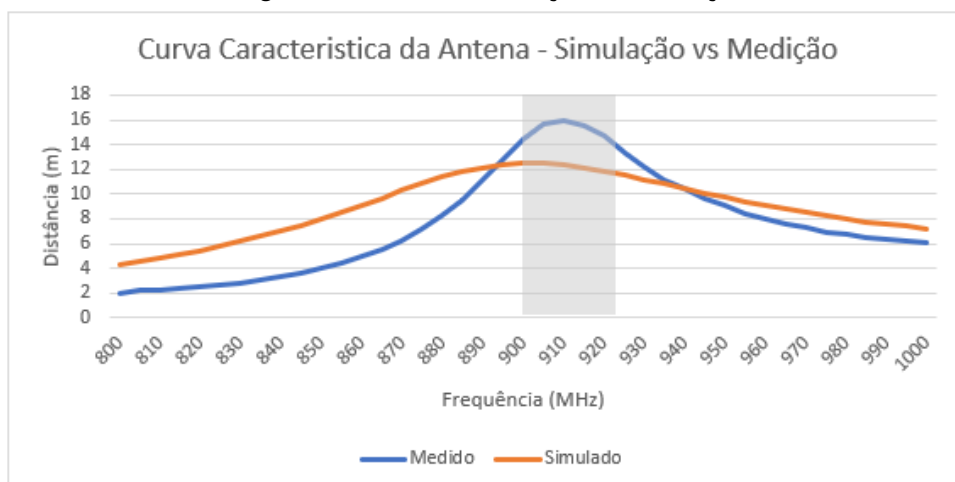
Após o processo de conversão, é possível realizar testes para obter a curva característica da antena, demonstrado na Figura 33. Para tanto, utiliza-se o TagFormance Pro + Câmara Anecoica para efetuar as medições no modo *Threshold*. Este procedimento permite a obtenção de informações precisas sobre o desempenho da antena em relação à leitura de etiquetas, o que é fundamental para a validação do projeto.

Figura 33 – Antena Dentro da Câmara Anecoica



Fonte: Autoria Própria (2023).

Figura 34 – Resultado Medição vs Simulação

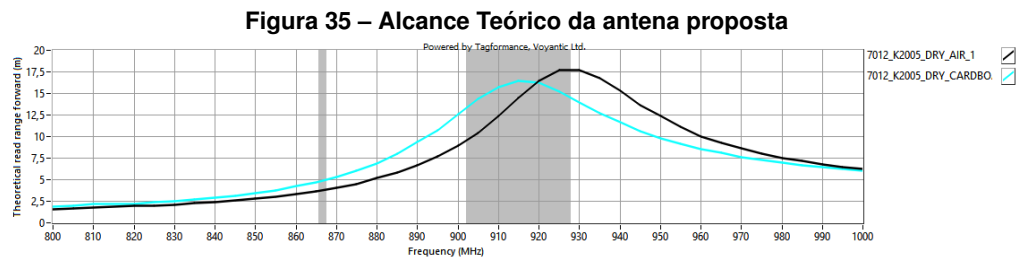


Fonte: Autoria Própria (2023).

Pelos resultados apresentados na Figura 34, é possível observar que o desempenho medido da antena é superior ao desempenho simulado. A leitura da antena pode chegar até 15 metros de distância, o que é muito promissor para o sucesso do projeto. Entretanto, é importante

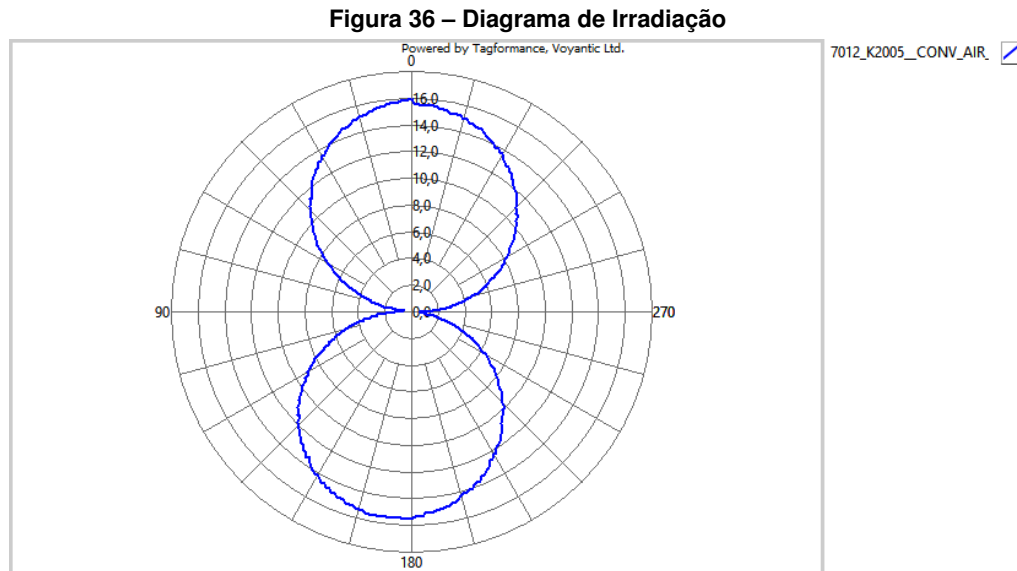
ressaltar que a discrepância entre a simulação e a medição pode ser atribuída principalmente aos materiais utilizados na simulação, que são considerados ideais e não levam em conta características como permissividade, que podem variar na prática.

O material utilizado na medição foi um pedaço de uma caixa de papelão, e sem os equipamentos adequados não é possível obter a permissividade exata do material. Apesar disso, as aproximações obtidas são satisfatórias e indicam que o projeto está progredindo de forma positiva. Na Figura 35 é demonstrado o deslocamento de frequência causado pelo material sobre a antena.



Fonte: Autoria Própria (2023).

Para obter-se o diagrama de irradiação da antena, Figura 36, Realizou-se um ensaio para avaliar a eficiência da antena ao rotacioná-la e manter a frequência fixa de 915 MHz, o que permitiu obter o alcance teórico e no caso de um dipolo, o diagrama de irradiação exibe um padrão de irradiação simétrico em relação ao eixo do dipolo.



Fonte: Autoria Própria (2023).

A partir do diagrama de irradiação de uma antena dipolo, é possível observar algumas informações importantes:

1. Direção de máxima radiação: O ponto onde a curva de irradiação atinge seu valor máximo representa a direção de máxima radiação da antena. Essa direção geralmente está ao longo do eixo do dipolo.
2. Lóbulos principais: O diagrama de irradiação exibe lóbulos principais, que são regiões de maior intensidade de radiação. Esses lóbulos estão concentrados ao redor da direção de máxima radiação e podem apresentar diferentes formatos e tamanhos, dependendo do design e das dimensões da antena dipolo.

5 CONCLUSÃO

Com o objetivo de demonstrar o processo de desenvolvimento de antenas UHF planares flexíveis por subtração química, este trabalho apresentou uma alternativa bem-sucedida de prototipação, utilizando o chip KX2005 da Kiloway para criar uma antena que atende às normas internacionais ISO 18.000-6C. Também foi demonstrado o sucesso da prototipação de uma antena flexível usando subtração química, resultando em uma antena com leitura superior a 10 metros, atendendo assim todos os objetivos propostos.

Esse desenvolvimento pode acelerar o processo de criação de novas antenas para diversas aplicações, beneficiando a indústria e tornando o mercado mais dinâmico com o surgimento de novas tecnologias. Além disso, experimentos em universidades podem ser usados para ensinar sobre a tecnologia RFID, aumentando o número de profissionais nessa área.

A tecnologia RFID tem um enorme potencial de aplicabilidade com o crescimento das tecnologias IoT, e suas características físicas, como circuitos pequenos, baixa espessura e falta de bateria de propósito único, permitem sua utilização em diversos setores.

REFERÊNCIAS

- ANATEL, . **Resolução nº 680, de 27 de junho de 2017**: REGULAMENTO SOBRE EQUIPAMENTOS DE RADIOCOMUNICAÇÃO DE RADIAÇÃO RESTRITA. [S.l.], 2017. Disponível em: <https://informacoes.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/2017/936-resolucao-680>. Acesso em: 29 mai 2022.
- ANSYS. **Software de simulação de campo eletromagnético de alta frequência**. 1990. Web. Disponível em: <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-hfss>. Acesso em: 07 Abr. 2023.
- CANADA, R. **Understanding RFID (Radio Frequency Identification (Passive RFID))**. 2012. Web. Disponível em: <https://www.rfidcanada.com/wp-content/uploads/2012/11/UNDERSTANDING-RFID-Nov-2012.pdf>. Acesso em: 27 Abril. 2023.
- CUSTODIO, G. M. B. P. Confeccao de placas de circuito impresso pelo processo de fototransferencia. **Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR-Campus Curitiba**, Out 2014. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/268054383/Tutorial-Confeccao-Pcb#>.
- DENNISON, A. **O liner e sua importância nos processos de conversão e rotulagem**. 2020. Web. Disponível em: <https://especialistaemrotulos.com.br/liner-conheca-sua-funcao-e-tipos/>. Acesso em: 17 Abril. 2023.
- GLOVER B.; BHATT, H. Fundamentos de rfid. **Alta Books**, Rio de Janeiro, p. 288, 2007.
- HUNT, V. D. **RFID: A guide to radio frequency identification**. WILEY-INTERSCIENCE, 2006. ISBN 978-0-470-11225-0. Disponível em: <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edsee&AN=edsee.8039696&lang=pt-br&site=eds-live&scope=site>. Acesso em: 15 MAIO. 2022.
- IMPINJ. **RFID TAG ANTENNA DESIGN**. [s.n.], 2017. Disponível em: https://support.impinj.com/hc/article_attachments/360000130460/TagAntennaDesignOverview-20170606.pdf.
- ISO. **ISO/IEC 18000-6:2010 Information technology — Radio frequency identification for item management — Part 6: Parameters for air interface communications at 860 MHz to 960 MHz**. 2005. Web. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/46149.html>. Acesso em: 15 Abr. 2023.
- KARMAKAR, N. C. **HANDBOOK OF SMART ANTENNAS FOR RFID SYSTEMS**. [s.n.], 2010. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/book/5732792>.
- KILOWAY. **KX2005X Datasheet**. 2013. Web. Disponível em: <https://www.kiloway.com/product/37/>. Acesso em: 15 Mar. 2023.
- LOPES, J. M. A. **Guia para a elaboração de placas de circuito impresso**. 2017. 27 p. Dissertação (Mestrado) — Centro de Competência de Ciências Exactas e da Engenharia) - Universidade da Madeira, Funchal, Portugal, 2017.
- MARQUES, C. A. A tecnologia de identificadores de rádio frequência (rfid) na logística interna industrial: pesquisa exploratória numa empresa de usinados para o setor aeroespacial. **GEPROS. Gestão da Produção, Operações e Sistemas**, <http://stitcs.com/EN/RFID/RFID%20Principles%20and%20Applications.pdf>, April 2009.

MCCORMICK, S. A. Simulation comparisons of three different meander line dipoles. **U.s. Army Research Laboratory**, Adelphi, p. 18, jan. 2015. ISSN 0104-530X. Disponível em: <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA617035.pdf>. Acesso em: 25 may 2022.

MILLIGAN, T. A. **Modern Antenna Design**. [s.n.], 2005. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/book/5238188>.

OLAODE, O. O.; PALMER, W. D.; JOINES, W. T. Effects of meandering on dipole antenna resonant frequency. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**, v. 11, p. 122–125, 2012.

RASHED, J.; TAI, C.-T. A new class of resonant antennas. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, v. 39, n. 9, p. 1428–1430, 1991.

WEIS, S. A. Rfid (radio frequency identification): Principles and applications. **MIT CSAIL**, <http://stitics.com/EN/RFID/RFID%20Principles%20and%20Applications.pdf>, 2006.

ZUFFANELLI, S. Mobile agents for supporting ubiquity in telecommunication services. In: CHAM, S. (Ed.). **Antenna Design Solutions for RFID Tags Based on Metamaterial-Inspired Resonators and Other Resonant Structures**. Departament d'Enginyeria Electrònica, Universitat Autònoma de Barcelona (UAB), Barcelona, Spain: [s.n.], 2017. p. 149.