

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA

ÁREA DE FÍSICA APLICADA

**Estudo da influência das propriedades de antenas
impressas no desempenho de identificadores RFID-HF**

Felipe Renger Ré

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E CIÊNCIAS EXATAS

RIO CLARO

São Paulo

2023

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“Júlio de Mesquita Filho”
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Câmpus de Rio Claro

FELIPE RENGHER RÉ

**Estudo da influência das propriedades de antenas
impressas no desempenho de identificadores RFID-HF**

Dissertação de mestrado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Campus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Física Aplicada.

Orientador: Giovani Fornereto Gozzi

Rio Claro - SP

2023

R281e Ré, Felipe Renger
Estudo da influência das propriedades de antenas impressas
no desempenho de identificadores RFID-HF / Felipe Renger
Ré. -- Rio Claro, 2023
79 f. : il., tabs., fotos

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista
(Unesp), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro
Orientador: Giovani Fornereto Gozzi

1. Física. 2. Física aplicada. 3. Sistemas de identificação por
radiofrequência. 4. Rádio Antenas. 5. Impressão. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do
Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“Júlio de Mesquita Filho”
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Câmpus de Rio Claro

FELIPE RENGHER RÉ

**Estudo da influência das propriedades de antenas
impressas no desempenho de identificadores RFID-HF**

Dissertação de mestrado apresentada ao
Instituto de Geociências e Ciências
Exatas do Campus de Rio Claro, da
Universidade Estadual Paulista “Júlio de
Mesquita Filho”, como parte dos requisitos
para obtenção do título de Mestre em
Física Aplicada.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Giovanni Fornereto Gozzi
IGCE/UNESP/Rio Claro (SP)

Prof. Dr. Leonardo Dias Cagnani
DevelopNow/São Carlos (SP)

Prof. Dr. Rafael Henriques Longaresi
CCN/UFSCar/ Buri (SP)

Conceito: Aprovado.

Rio Claro (SP), 27 de Junho de 2023.

AGRADECIMENTO

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Giovani Gozzi, pelas orientações, pelos ensinamentos, pelo amparo e pela paciência com meu processo de aprendizado.

Agradeço a empresa parceira TICON e pessoalmente ao seu dono Henry Fellegara pelo apoio e pela oportunidade.

Agradeço aos técnicos André Paganotti Faber, Geraldo Ap. de Lima Sobrinho e Leandro Xavier Moreno pelo auxílio que me deram quando eu encontrei dificuldades e pela eterna disposição em ajudar.

Agradeço aos colegas de laboratório Breno Oliveira, Bruno Cantuária, Bruno Farias, Danilo Santos, Gabriel Matos, Gabriel Oliveira, Guilherme Kubo, João Mendes, João Paulo Braga e Kemyle Carvalho, pelas dicas, pelo amparo e pela boa convivência durante o desenvolvimento das atividades.

Agradeço aos meus pais por todo o apoio que me deram para que eu pudesse chegar até aqui e pelos ensinamentos que me guiaram pela vida.

Agradeço também a minha companheira de vida Mariana Kronemberger Mantelli pelo carinho, compreensão e dias felizes, que fazem com que todo trabalho tenha mais sentido.

O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). Processo: 131264/2021-4

RESUMO

Na área de identificadores por radiofrequência (RFID) com operação na faixa de altas frequências (HF) a utilização de antenas impressas se demonstra desafiadora, contando com poucos estudos reportados na literatura. Neste contexto, o presente estudo teve como propósito a avaliação de como as propriedades das antenas impressas afetam o desempenho dos identificadores. Para isso, avaliamos a viabilidade da aplicação de antenas fabricadas com pasta prata (PTF-Ticon) e pasta condutora transparente (PCT-Ticon) em dispositivos RFID-HF, expandindo assim o conhecimento nessa área pouco estudada. As antenas fabricadas com estes materiais foram caracterizadas com relação a sua resistência elétrica, perfil de atenuação em 13,56 MHz, força eletromotriz gerada e fator de qualidade. As propriedades das antenas impressas foram então comparadas com antenas análogas de cobre utilizadas como referência. Nestes ensaios, a influência da resistência elétrica das antenas, bem como da capacitância para sintonia foram avaliadas, permitindo a identificação de como estes fatores interferem no desempenho de identificadores RFID. Testes práticos dos identificadores foram realizados por meio da conexão das antenas a um CI comercial seguido de um teste de leitura com um detector RFID RC522. Adicionalmente, realizamos estudos para o desenvolvimento de formulações alternativas da PCT e estudos da adesão deste material sobre PET, PP e celofane. Nesta etapa do estudo, demonstramos melhor compatibilidade do material PCT com substratos de PET. Empregando estes substratos, realizamos estudos para produção de capacitores de sintonia impressos empregando o próprio substrato como dielétrico e desenvolvemos uma estratégia para viabilizar a conexão elétrica entre camadas condutoras depositadas nas faces opostas do substrato.

Palavras chave: Física; Física aplicada; Sistemas de identificação por radiofrequência; Rádio Antenas; Impressão.

ABSTRACT

In the area of radio frequency identifiers (RFID) operating in the high frequency (HF) range, the use of printed antennas proves to be challenging, with few studies reported in the literature. In this context, the present study aimed to evaluate how the properties of printed antennas affect the performance of identifiers. For this, we evaluated the feasibility of applying antennas made with silver paste (PTF-Ticon) and transparent conductive paste (PCT-Ticon) in RFID-HF devices, thus expanding knowledge in this little-studied area. The antennas manufactured with these materials were characterized regarding their electrical resistance, attenuation profile at 13.56 MHz, generated electromotive force and quality factor. The properties of the printed antennas were then compared with analogue copper antennas used as a reference. In these tests, the influence of the electrical resistance of the antennas, as well as the capacitance for tuning were evaluated, allowing the identification of how these factors interfere in the performance of RFID identifiers. Practical tests of the identifiers were carried out by connecting the antennas to a commercial IC followed by a reading test with an RC522 RFID detector. Additionally, we carried out studies for the development of alternative PCT formulations and studies of the adhesion of this material on PET, PP and cellophane. At this stage of the study, we demonstrated better compatibility of the PCT material with PET substrates. Using these substrates, we carried out studies for the production of printed tuning capacitors using the substrate itself as a dielectric and we developed a strategy to enable the electrical connection between conductive layers deposited on opposite sides of the substrate.

Keywords: Physics; Applied Physics; Radio frequency identification systems; Radio Antennas; Printing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tipos de comunicação entre os diferentes tipos de RFID.....	16
Figura 2 - Componentes e forma de uma tag RFID HF típica.....	17
Figura 3 - Arquitetura elétrica básica de uma tag RFID HF.....	17
Figura 4 - Esquema elétrico da ponte de reflexão.....	28
Figura 5 - Fotografia do Lock-In SR844.....	29
Figura 6 - Programa de controle do lock-in.....	29
Figura 7 - Arranjo Arduino MEGA e módulo RC 522 para detecção RFID.....	31
Figura 8 - Diagrama esquemático e circuito equivalente do CI NXP NTAG213.....	32
Figura 9 - Materiais para a produção de antenas em cobre.....	34
Figura 10 - Designs das antenas do ensaio de capacitância máxima.....	36
Figura 11 - Exemplo de medida de fator de qualidade.....	38
Figura 12 - Classificação de adesão da norma ABNT NBR 110003:2009 baseada no destacamento da tinta dentro da área quadriculada.....	40
Figura 13 - Esquema da tela para impressão do perfil de PCT utilizado no ensaio de resistência de folha.....	41
Figura 14 - Esquema da tela para impressão de eletrodos de pasta prata do ensaio de resistência de folha.....	42
Figura 15 - Materiais para a produção de antenas impressas.....	43
Figura 16 - Tag RFID utilizada para a extração do CI NXP NTAG 213.....	44
Figura 17 - Perfil de atenuação das tags comerciais.....	44
Figura 18 - Arranjo de conexão do CI.....	45
Figura 19 - Antena de cobre.....	47
Figura 20 - Gráfico da curva de atenuação da antena de cobre acoplada ao capacitor de 3,2 nF.....	47
Figura 21 - Atenuação das antenas ligadas ao capacitor de 50 pF.....	48
Figura 22 - Atenuação das antenas após correção da capacitância adicionada...	50
Figura 23 - Resultados do ensaio de força eletromotriz.....	51
Figura 24 - Antenas de menor razão de aspecto construídas em cobre.....	52
Figura 25 - Medidas de atenuação das antenas de menor razão de aspecto construídas em cobre.....	53
Figura 26 - Fator de qualidade em função da resistência.....	54
Figura 27 - Fotografia de um capacitor impresso produzido com PTF.....	56
Figura 28 - Fotografia do ensaio de conexão dupla face.....	57
Figura 29 - Antenas impressas em prata.....	58
Figura 30 - Medidas de atenuação das antenas de PTF de duas, três e quatro espiras.....	59
Figura 31 - Antenas de baixa razão de aspecto utilizando a nova estratégia de sintonização.....	60
Figura 32 - Medidas de atenuação das antenas utilizando a nova estratégia de sintonização fabricadas em cobre e PTF.....	60

Figura 33 - Antena de PTF de três espiras.....	61
Figura 34 - Comparativo de atenuação entre as antenas de uma e três espiras...	62
Figura 35 - Antenas impressas antes da deposição do núcleo de ferro.....	64
Figura 36 - Antena impressa com o núcleo impresso.....	64
Figura 37 - Atenuação das antenas antes e depois da impressão do núcleo à base de pó de ferro.....	64
Figura 38 - Resistência em função da razão de aspecto de filmes de PCT depositados sobre PET.....	66
Figura 39 - Resistência em função da razão de aspecto de filmes de PCT depositados sobre celofane.....	66
Figura 40 - Resistência em função da razão de aspecto para diferentes concentrações de condutor.....	68
Figura 41 - Resistência de folha em função da concentração de condutor.....	69
Figura 42 - Condutividade em função da concentração de condutor.....	69
Figura 43 - Antenas de PCT com dez camadas.....	71
Figura 44 - Antena de PCT fabricada manualmente.....	71
Figura 45 - Medida de atenuação da antena de PCT fabricada manualmente.....	72
Figura 46 - Medida de atenuação de uma antena fabricada em cobre com resistência semelhante a antena de PCT.....	72
Figura 47 - Medida de atenuação de uma antena fabricada em cobre com resistência total de 60 Ω	73
Figura 48 - Medida de atenuação de uma antena fabricada em cobre com resistência total de 150 Ω	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Ligações do arranjo arduino-módulo RFID.....	31
Tabela 2 - Características das antenas do ensaio de capacitância externa.....	35
Tabela 3 - Características das antenas do ensaio de capacitância externa.....	49
Tabela 4 - Características das antenas do ensaio de capacitância externa após correção.....	50
Tabela 5 - Capacitâncias específicas dos substratos estudados.....	56
Tabela 6 - Medidas de força eletromotriz em antenas impressas em PTF.....	63
Tabela 7 - Variação das indutâncias após a deposição dos núcleos.....	65
Tabela 8 - Resultados de adesão de PCT em diferentes substratos.....	67
Tabela 9 - Resultados conexão dupla face com PCT.....	67
Tabela 10 - Resultados de adesão por temperatura de secagem.....	70
Tabela 11 - Fator de qualidade das antenas produzidas.....	74

LISTA DE ABREVIATÖES

ABNT - Associação Brasileira de Normas e Técnicas

CI - Circuito integrado

E-IMP - Laboratório de eletrônica impressa

FR4 - Substrato de fibra de vidro reforçado com epoxi

GPTMS - 3-glycidoxypopyltrimethoxysilane

NFC - Near field connection (Conexão de campo próximo)

PCT - Pasta condutora transparente

PCB - Circuito impresso

PTF - Pasta condutora à base de prata

RFID - Identificador de radiofrequência

Sumário

1. INTRODUÇÃO:	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA:	19
2.1 Antenas RFID - HF impressas:	19
3. MATERIAIS E MÉTODOS:	28
3.1 Aparato experimental para tuning e testagem das antenas:	28
3.1.1 Ponte de reflexão ou ponte de perda de retorno:	28
3.1.2 Detecção Rfid:	30
3.2 Dimensionamento das antenas e produção de antenas:	32
3.2.1 Projeto das antenas para o CI NXP NTAG213:	32
3.2.2 Produção de antenas em cobre:	33
3.2.3 Ensaio de capacitância externa:	35
3.2.4 Ensaio de força eletromotriz gerada nas antenas:	36
3.2.5 Ensaio de resistência elétrica e fator de qualidade:	37
3.3 Ensaios relativos às pastas condutoras e impressão de antenas:	38
3.3.1 Ensaio de adesão:	38
3.3.2 Ensaio de resistência de folha:	41
3.3.3 Produção de antenas impressas:	42
3.4 Tags e conexão com o CI:	43
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO:	46
4.1 Antenas fabricadas em cobre:	46
4.1.1 Antenas de mínima razão de aspecto:	46
4.1.2 Ensaio de capacitância externa:	48
4.1.3 Ensaio de força eletromotriz gerada nas antenas:	51
4.1.4 Antenas de três espiras e menor razão de aspecto:	52
4.1.5 Fator de qualidade em função da resistência:	53
4.2 Ensaios utilizando PTF:	55
4.2.1 Capacitores com PTF:	55
4.2.2 Ensaio conexão dupla face PTF:	57
4.2.3 Antenas impressas em PTF:	58
4.2.4 Antenas impressas em PTF com indutor acoplado:	59
4.2.5 Antena de três espiras e baixa razão de aspecto:	61
4.2.6 Ensaios de força eletromotriz em antenas de tinta prata:	62
4.3 Ensaios com núcleos impressos de alta permeabilidade magnética:	63
4.3.1 Tinta à base de pó de ferro:	63
4.4 Ensaios utilizando pasta condutora transparente:	65
4.4.1 Ensaios de deposição de PCT sobre diferentes substratos:	65
4.4.2 Ensaio conexão dupla face PCT:	67
4.4.3 Ensaio de resistência de folha e condutividade em função da concentração de condutor em formulações de PCT:	68

4.4.4 Adesão por temperatura de secagem:.....	70
4.4.5 Antenas impressas com PCT:.....	71
4.5 Fator de qualidade das antenas:.....	74
5. CONCLUSÃO:.....	76
6. REFERÊNCIAS:.....	77
APÊNDICE A - Programa para detecção RFID:.....	79

1. INTRODUÇÃO:

Segundo a Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica, a classe dos equipamentos elétricos e eletrônicos, somou US\$ 45,27 bilhões de dólares em importações em 2022, enquanto que as exportações desse setor somaram US\$ 6,70 bilhões, pesando negativamente na balança comercial. Os dados de comércio exterior revelam que o Brasil possui um grande mercado consumidor de produtos tecnológicos e, ao mesmo tempo, apresenta declínio percentual de sua produção industrial categorizada como de alta intensidade tecnológica em relação à produção industrial geral. No sentido de reverter este quadro, foi feito um estudo para identificar os segmentos estratégicos que demandam maior desenvolvimento tecnológico no Brasil. Dentre os segmentos identificados, dois deles são contemplados dentro do presente projeto, o de eletrônicos e o de químicos.

Neste contexto, esse trabalho visa o desenvolvimento de novos produtos químicos e eletrônicos com elevada intensidade tecnológica junto à indústria nacional, já que vem sendo desenvolvido conjuntamente à Indústria de Tintas Condutivas TICON. A empresa parceira produz pastas de prata para aplicações em eletrônica impressa, mais especificamente para o mercado de vidros automotivos e de teclados de membrana. Para esta empresa, o desenvolvimento de novos materiais e dispositivos para eletrônica impressa impacta diretamente a manutenção e amplificação de mercado.

Além do impacto direto no desenvolvimento de novos produtos com elevada intensidade tecnológica, o presente projeto contribui para o setor de tecnologia e inovação no Brasil em áreas prioritárias, estabelecidas na Portaria MCTIC nº 1.122, de 19.03.2020, nas áreas de Materiais Avançados (Tecnologias Habilitadoras) e de Indústria (Tecnologias de Produção). Além disso, o modelo de gestão desse trabalho promove a transferência de tecnologia e a capacitação de recursos humanos em processo colaborativo entre a universidade e a indústria sob uma perspectiva de dupla via. Neste processo, há ampliação das capacidades científicas e tecnológicas de ambas as instituições, bem como a capacitação das equipes destas sob perspectiva mais ampla e multidisciplinar.

Em etapas anteriores, a equipe E-IMP (laboratório de eletrônica impressa do departamento de física da Unesp Rio Claro) desenvolveu produtos em colaboração com a indústria química, e embora tenhamos o objetivo de desenvolver novos

produtos para o setor, no atual estágio do trabalho da equipe há necessidade de desenvolvimento de protótipos de produtos construídos com as pastas condutoras pertinentes a parceria do grupo de pesquisa com a empresa TICON. Deste modo, foi realizada a prototipagem de antenas para identificadores por radiofrequência (RFID) na faixa de alta frequência (HF) utilizando pastas condutoras prata e transparente.

Dispositivos de identificação por radiofrequência, do inglês, *Radio Frequency Identification Devices* (RFID) existem desde o começo do século 20, mas foi apenas depois da invenção do circuito integrado que esses dispositivos começaram a ser produzidos com pequeno tamanho e custo reduzido, de forma a se tornarem viáveis em aplicações de identificação de produtos. O propósito desses dispositivos é a identificação sem fio de objetos, e para que um sistema RFID funcione são necessários três componentes básicos, a tag, o leitor e o servidor.

A tag é composta por uma antena e por um circuito integrado, o circuito integrado possui uma memória contendo o código de identificação. O leitor é o equipamento que realiza a leitura da informação contida na memória da tag e o servidor é o banco de dados que compara a informação captada pelo leitor para identificar o objeto na qual a tag está inserida.

A informação contida na memória da tag é acessada no processo em que o leitor emite um sinal eletromagnético em uma frequência específica (que varia de acordo com o tipo de RFID), a antena da tag converte esse sinal eletromagnético em uma corrente elétrica que alimenta o CI. O CI então modula o sinal digital usando modulação de fase ou de amplitude, o leitor então recebe o sinal modulado e o interpreta comparando com o banco de dados para identificar o dispositivo.

Os dispositivos RFID podem ser classificados de acordo com dois critérios fundamentais: sua frequência portadora (LF - baixa frequência, HF - alta frequência e UHF - ultra alta frequência) e fonte de energia (passivo ou ativo).

A frequência portadora define mudanças na aplicabilidade dos dispositivos já que esse parâmetro define a permeabilidade do sinal em diferentes meios, o tipo de interferência a que estão sujeitas, seu preço, alcance, quantidade de informação passível de ser transmitida pelo sinal e a velocidade de leitura de informações (frequências maiores permitem transmissão de informação mais rapidamente, já que a quantidade de ondas moduladas por segundo é maior). A fonte de energia define a necessidade de incorporar uma bateria ao sistema, já que nas fontes passivas toda a energia utilizada vem da absorção do sinal emitido pelo leitor. A adição de uma

bateria permite a maior potência do sinal emitido pela tag, aumentando sua distância de operação, porém vem acompanhada de uma gama de inconvenientes como o aumento do custo e da complexidade das tags.

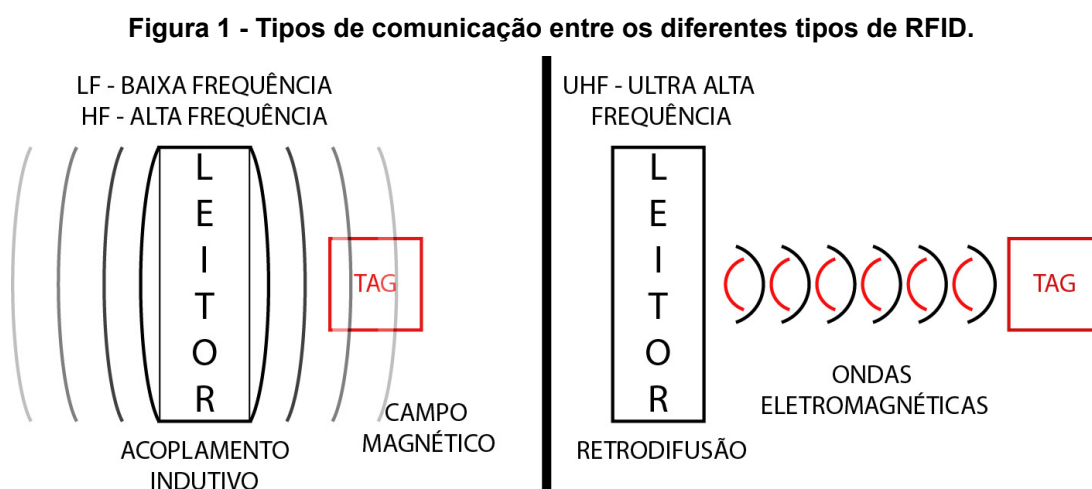
A tecnologia LF opera usualmente com as frequências portadoras de 125 KHz e 134,2 KHz e funciona por acoplamento indutivo, a grande vantagem desses sistemas é que essas frequências não são afetadas pela água e são menos afetadas por metais, o que torna essas tags ideais para identificadores em implantes animais e em peças metálicas. A grande desvantagem de um dispositivo LF é a necessidade de incorporação de uma antena grande, o que eleva o custo das tags. Em frequências tão baixas também é necessário considerar interferências com ruído eletromagnético, gerado por equipamentos elétricos. A taxa de transferência de informação e a distância de leitura dessa tecnologia são as mais baixas dentre as três tecnologias, o que torna inviável aplicações que envolvem a leitura de várias tags ao mesmo tempo e de leitura a distâncias maiores.

A tecnologia UHF opera geralmente com frequências da banda entre 860 MHz e 960 MHz mas também tem aplicações com 433 MHz e 2,4 GHz. O processo de comunicação dessa tecnologia ocorre por retrodifusão, o que significa que ondas eletromagnéticas geradas pelo leitor são moduladas e posteriormente refletidas pela tag. O processo de retrodifusão permite leituras com distâncias maiores e em velocidade mais alta quando comparado com o acoplamento indutivo, o que permite a leitura de muitas tags simultaneamente e em um ambiente grande, fazendo com que essa tecnologia tenha grande aplicabilidade em controle de estoques. As antenas utilizadas são menores e mais simples, o que abaixa o custo das tags, porém a natureza da retrodifusão (ondas eletromagnéticas) é extremamente sensível a presença de água e metais, possui um limite máximo para o pacote de informação transmitido pela tag e é comum que haja interferência com outros dispositivos transmissores.

A tecnologia HF, foco do presente trabalho, possui a maior fatia do mercado de RFID e funciona na frequência de 13,56 MHz de forma padronizada ao redor do mundo. Assim como os sistemas LF, a tecnologia HF utiliza acoplamento indutivo, e por isso o sinal em HF não é tão afetado pela água, porém possui performance inferior a LF quando precisa atravessar metais. Em contraste com a tecnologia LF o sinal HF não é afetado por ruído de equipamentos elétricos, as tags podem portar antenas menores e mais baratas e é possível realizar a leitura de várias tags

simultaneamente. As características desse segmento encontraram grande aplicabilidade em cartões de acesso e cartões bancários de aproximação. (Fennani; Hamam; Dahmane, 2011)

A tecnologia NFC é um braço da tecnologia RFID HF, ela permite a transferência de dados a uma taxa máxima de 424 kbps a curta distância (poucos centímetros) entre dispositivos utilizando a frequência padrão de 13,56 MHz. Um dispositivo NFC possui compatibilidade com etiquetas RFID HF de 13,56 MHz já existentes no mercado.

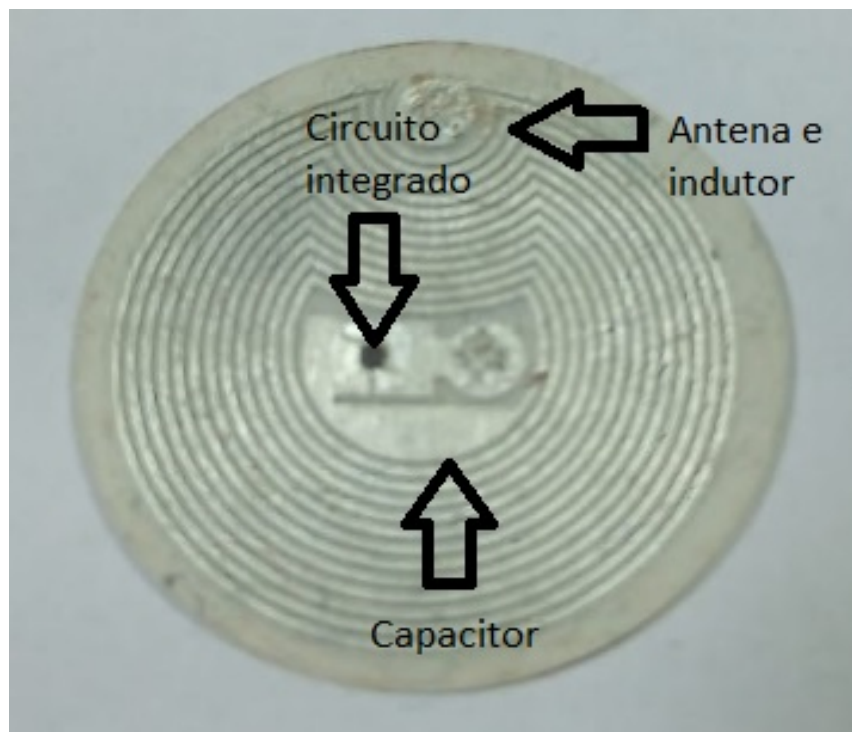


Fonte: Elaboração própria

A comunicação RFID HF, conforme esquematizado na figura 1, funciona por indução magnética, e é justamente por isso que o seu alcance é tão pequeno. Para que seja possível realizar leituras das tags RFID HF ou dispositivos NFC é necessário que o arranjo antena circuito integrado funcione como um dos lados de um transformador (considerando a antena do leitor como o outro lado do transformador) e também como um circuito ressonante RLC de frequência de ressonância de aproximadamente 13,56 MHz, para que ocorra o ganho necessário para a ativação do CI. Dessa forma, considerando C_{IC} como a capacitância do circuito integrado e R_{IC} sua resistência, C_{con} a capacitância da ligação entre CI e antena, R_{con} a resistência dessa ligação, e com C_c , R_{pc} e L_{pc} representando a capacitância integrada a antena, a resistência e a indutância da antena

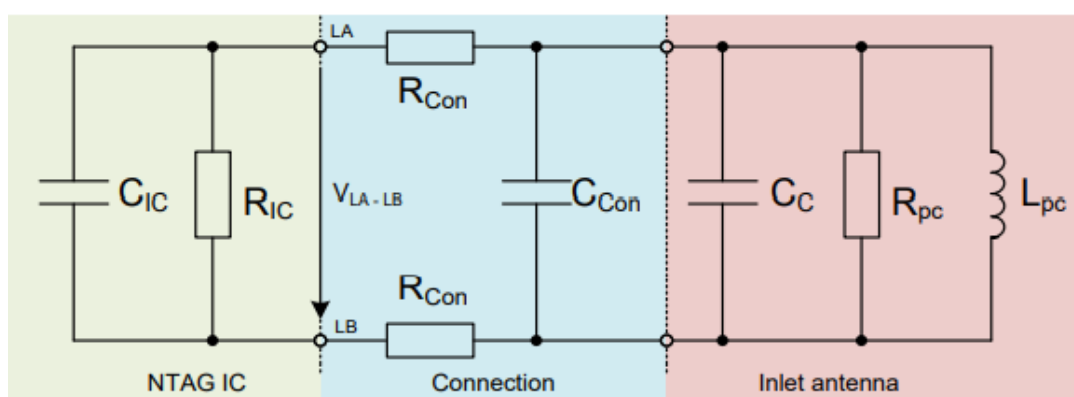
respectivamente, as tags possuem a forma usual conforme é possível observar na figura 2 e estrutura elétrica básica esquematizada na figura 3.

Figura 2 - Componentes e forma de uma tag RFID HF típica.



Fonte: Elaboração própria

Figura 3 - Arquitetura elétrica básica de uma tag RFID HF.



Fonte: Guia de design de antenas NTAG AN 11276.

Para o funcionamento do sistema, alguns critérios precisam ser atendidos, a frequência ressonante do circuito equivalente precisa estar próxima a 13,56 MHz e a área da antena deve possuir um valor mínimo para que haja indução magnética. Outro fator a ser considerado é o fator de qualidade da antena Q que, se

denominarmos a indutância equivalente da tag como L , sua resistência equivalente como R e nomeando a frequência de operação de 13,56 MHz de f possui a seguinte forma:

$$Q = \frac{2\pi f L}{R} \quad (1)$$

O fator de qualidade define o amortecimento do circuito ressonante, de forma que quanto maior o seu valor, menor a largura da banda de ressonância e maior a resposta induzida no ponto de frequência de ressonância, o fator de qualidade precisa ser suficientemente alto para o funcionamento do CI, e como o fator de qualidade é inversamente proporcional a resistência e é proporcional à indutância, podemos inferir que a resistência de folha do material que compõe a antena possui um valor máximo.

As pastas condutoras possuem resistências de folha muito maiores do que as dos metais, usualmente utilizados para a construção dessas antenas, o que torna inviáveis os formatos usuais de antenas comerciais já que as trilhas dessas antenas são muito longas. Outro fator a se considerar é que o processo de impressão também traz desafios, pois as características de molhabilidade, aderência e percolação de cada pasta nos possíveis substratos devem ser acessadas.

Durante o trabalho, perfis não usuais de antenas, com razões de aspecto menores, foram projetados e construídos em cobre para checar a possibilidade de seu funcionamento em função da forma. Razão de aspecto é a divisão entre o comprimento de um objeto pela sua largura. Formas de antenas viáveis com razões de aspecto menores são interessantes para a construção de antenas impressas já que para uma resistência de folha fixa, a razão de aspecto é diretamente proporcional à resistência total de uma trilha.

Os ensaios com antenas de cobre revelaram as melhores formas para antenas, que foram então testadas utilizando pastas condutoras prata da TICON e a formulação com menor resistência de folha da pasta condutora transparente. Capacitores e indutores comerciais foram acoplados às antenas testadas para garantir que a frequência de ressonância das mesmas estivesse na faixa desejada. Capacitores impressos foram produzidos com sucesso utilizando pasta condutora prata para validar a possibilidade de tags serem integralmente impressas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA:

2.1 Antenas RFID - HF impressas:

Em uma busca no Web of science sobre antenas RFID HF impressas nos últimos 10 anos podem ser encontrados apenas 23 resultados, o que revela que essa ainda é uma área pouco estudada, os estudos se concentram na produção de antenas impressas por técnicas de serigrafia, ink-jet e impressão direta, nenhum dos estudos encontrados aborda a impressão de antenas utilizando uma tinta à base de polímero condutor, esta revisão bibliográfica tem como objetivo encontrar possibilidades de melhoria nos processos utilizados na produção de dispositivos RFID HF impressos, dessa forma estudos com elementos que podem atender a esse objetivo são descritos nessa seção.

Um estudo muito relevante para o presente trabalho consiste em uma caracterização de filmes produzidos por serigrafia simples e rotativa utilizando diversas tintas condutoras poliméricas à base de prata (Du Pont (DP 5029, DP 5064), ESL (ESL 1901-S) e Amepox (Amepox ER 53A) e quatro tintas experimentais preparadas pela Amepox (Amepox 55, Amepox 59, Amepox 63 e Amepox 70). As tintas foram impressas em diversos substratos (poliamida (Kapton), poliéster e papel PE Gloss Clear) (Dziedzic; Slobodzian, 2011). Nesse trabalho foram realizadas medidas de qualidade de impressão, indutância, resistência elétrica, fator de qualidade, resistência por temperatura de secagem e de variação dos parâmetros elétricos, após ciclos de dobragem e envelhecimento em diferentes períodos, temperaturas e condições de umidade.

Esse estudo considera tintas equivalentes a PTF de forma que é possível que haja transferência de alguns resultados, as tintas tiveram resistências elétricas equivalentes (embora a Amepox 70 tenha apresentado condutividade final levemente superior) após secagem a 120 °C. As formulações da DuPont atingiram a condutividade esperada mesmo com secagem a 90 °C e apresentaram os melhores fatores de qualidade. A composição da ESL não tem grande desvantagem em fator de qualidade quando comparada com as composições da DuPont, e apresentou mais estabilidade em todos os substratos e condições de cura. Houve um grande shift de frequência entre as antenas teóricas e as reais, (teóricas com 13,56 MHz e

reais entre 21 - 25 MHz). Os testes de envelhecimento e dobração mostraram grande estabilidade das formulações estudadas.

Em outro estudo, antenas RFID - HF foram produzidas utilizando uma tinta composta por nanopartículas de prata, etanol e etilenoglicol utilizando o processo de ink-jet, e posteriormente recebendo tratamento de sinterização (Allen et al., 2009). A condutividade obtida com esses processos foi de aproximadamente 25% da condutividade da prata metálica e a espessura típica nesses moldes de impressão foi de aproximadamente 500 nm por camada. Para produzir antenas com fator de qualidade minimamente satisfatório para operação, utilizando esses materiais e processos, eram necessárias três camadas impressas e a repetição do processo de sinterização para cada camada, o que demonstra que essa abordagem é menos viável comercialmente pela necessidade de repetição de processos.

Outro trabalho que envolveu a elaboração de antenas RFID - HF impressas foi a construção de sensores de umidade RFID. Os sensores foram elaborados aproveitando o fato de que o material utilizado como substrato (poliamida) tem sua permissividade dielétrica dependente da umidade (Fernandez-Salmeron *et al.*, 2015). Os sensores elaborados nesse trabalho são capacitores que têm sua capacitância alterada com a umidade, esses capacitores estão ligados a uma tag RFID, e a alteração de sua capacitância causa uma mudança na frequência ressonante da tag para diferentes umidades. Neste estudo tanto os indutores como os capacitores foram impressos utilizando a técnica de ink-jet e serigrafia, com tintas condutivas à base de prata. A técnica ink-jet teve resultados insatisfatórios para o fator de qualidade dos indutores/antenas, e a impressão por serigrafia dos capacitores/sensores levou a um shift de frequência insatisfatório, devido a uma menor alteração da capacitância em função da umidade. Uma abordagem mista (antena impressa por serigrafia e capacitores por ink-jet) se mostrou viável para funcionar como sensor com duas possibilidades de operação. Uma possibilidade seria planejar a frequência ressonante de uma tag com CI para estar dentro do espectro de leitura apenas dentro de um intervalo de umidade e a outra possibilidade seria utilizar uma tag sem CI e registrar sua frequência ressonante, de forma que esta teria relação direta com a umidade.

Antenas RFID - HF também foram impressas por serigrafia em substratos magnéticos (RFN4 e RFN7) e em polietileno naftalato (para comparativo) utilizando pastas poliméricas com flocos de prata (PM-406 e SF) (Janeczek et al., 2016).

Nesse estudo foi possível constatar que a espessura e rugosidade da superfície das antenas impressas foram maiores para os substratos magnéticos em comparação com as antenas impressas em polietileno naftalato. As indutâncias das antenas impressas apresentaram boa conformidade com os parâmetros esperados, porém suas resistências apresentaram grande divergência, os menores valores de resistência foram obtidos utilizando a pasta PM-406 no substrato de polietileno naftalato e os maiores com a pasta SF nesse mesmo substrato. Esse trabalho revelou que é essencial estudar a compatibilidade de cada formulação de tinta para cada substrato. A folha magnética RFN4 se apresentou como a melhor alternativa para a construção de transponders magnéticos, já que as antenas impressas nesse substrato apresentaram menor resistência e melhor fator de qualidade.

Uma nova técnica de impressão chamada Direct Ink Writing (DIW), que consiste na extrusão de tinta por uma cabeça móvel controlada por computador, também foi revelada pela revisão bibliográfica. Essa técnica se sobressai pela facilidade de prototipagem de novas formas de antena, e foi testada em dois estudos para produzir antenas RFID/NFC miniaturizadas impressas em diversos substratos flexíveis com sucesso. No primeiro estudo foram testadas três formulações de tintas condutivas à base de prata de uma empresa chamada Voltera, uma das formulações era a já utilizada pela empresa e as outras duas são propostas de atualização da tinta. As antenas impressas com essas formulações tiveram suas resistências medidas em um traçado de antena de 110 mm x 80 mm impresso sobre FR4 (Para efeito de comparação um análogo de cobre produzido por corrosão de placa de fenolite nesse traçado possui resistência de 78.34 m Ω) e obtiveram como resultado 660 m Ω para a formulação padrão, 13.3 Ω para a primeira formulação atualizada e 136,70 m Ω na segunda formulação atualizada (Le et al., 2019).

Nesse mesmo trabalho também foram impressas e testadas antenas com uma nova dimensão (60 mm x 40 mm) usando as mesmas três formulações de tinta em substratos de papel, FR4 e PET. Novamente a segunda formulação atualizada apresentou os melhores resultados de impedância, essa formulação também se mostrou mais vantajosa em testes de atenuação de sinal (exatidão da frequência e intensidade). As antenas impressas utilizando a segunda formulação atualizada sobre PET apresentaram a menor resistência (107.26 m Ω), seguidas das impressas com a mesma tinta sobre substrato FR4 (116.31 m Ω) e sobre papel (131.92 m Ω). As antenas com menor resistência foram sujeitadas a um teste de tempo de vida (7 dias

a -5 °C e posteriormente mais 7 dias a 65 °C com umidade de 98%), tanto desprotegidas, quanto utilizando um selante (SK10). As antenas desprotegidas não apresentaram degradação no teste de tempo de vida, já as antenas que foram cobertas pelo selante apresentaram alterações significativas de seus parâmetros, revelando uma interação desvantajosa causada pela aplicação do selante.

No segundo estudo envolvendo antenas impressas por DIW, foi utilizada uma versão atualizada da tinta à base de prata da empresa Voltera. As antenas impressas atingiram desempenho semelhante a antenas fabricadas com cobre (resistências de 50.53 mΩ para o cobre e 116.26 mΩ para as antenas impressas, com demais características elétricas semelhantes) (Le; Lemmer; Mackensen, 2020).

Nesse segundo trabalho foram utilizados substratos de papel e de PET, os substratos de PET novamente apresentaram os melhores resultados, o que pode ter sua causa acessada por microscopia, já que a rugosidade superficial do PET é maior que a da camada impermeabilizante depositada sobre o papel, o que permite distribuições mais homogêneas da tinta, levando a uma melhor condutividade. Testes de dobragem de 0° a 180° provaram a flexibilidade do dispositivo RFID/NFC produzido por esse método, e testes de tempo de vida demonstram que não é necessário o encapsulamento das antenas, os autores do trabalho concluíram que esse método pode se mostrar viável no futuro para outros tipos de tinta condutiva.

Outra tentativa de adequar substratos de papel para TAGs RFID - HF se encontra em um trabalho que analisou 76 diferentes substratos de base fibrosa não revestidos (papel, papelão e materiais do tipo) e duas tintas à base de prata (Orgacon SI-P2000 e Loctite ECI 1011) com o objetivo de descobrir o melhor tipo de substrato para compor caixas nas quais fosse possível a impressão de tags RFID diretamente (Machiels et al., 2021). Para selecionar os substratos viáveis, trilhas das tintas condutoras foram impressas sobre todos os substratos, e os substratos em que a resistência de folha da trilha impressa fosse maior que 50 mΩ/sq foram descartados. A resistência ao calor (essencial para que pudesse ser realizado o processo de sinterização), também foi critério de seleção de substratos, foram descartados os substratos com deformações a 150 °C. Os autores estabeleceram que substratos com rugosidade RA abaixo de 1500 nm e permeabilidade de ar menor do que 40 ml/min seriam menos adequados para a impressão, e então substratos com essas características foram descartados. Mesmo após essa filtragem, devido ao grande número de substratos viáveis, critérios visuais e

mecânicos ainda foram utilizados para reduzir a gama de substratos, e finalmente foi selecionado um substrato (Magno Satin) devido a seu bom desempenho em testes de reciclagem para a impressão das antenas.

As antenas impressas com a tinta Orgacon SI-P2000 apresentaram resistência elétrica média de $38.2 \pm 1.9 \, \Omega$ e indutância de $2.35 \pm 0.01 \, \mu\text{H}$, enquanto as antenas impressas com a tinta Loctite ECI 1011 apresentaram resistência elétrica média de $22.1 \pm 2.3 \, \Omega$ e indutância de $2.97 \, \mu\text{H}$. Devido aos parâmetros elétricos, apenas as antenas fabricadas com a segunda tinta passaram em um teste de leitura de código RFID, porém isso não indica inviabilidade da primeira tinta, apenas indica que haveria necessidade de adaptação do design das antenas e/ou do método de impressão para viabilizá-la. O protótipo elaborado foi considerado viável como uma antena RFID - HF impressa em papel por serigrafia sem necessidade de encapsulamento.

Ainda utilizando a técnica de serigrafia e uma tinta à base de partículas de prata, um outro estudo tentou acessar a viabilidade de confecção de antenas para leitores de RFID - HF de grande área, impressas em papel fotográfico HP (Li, X. et al., 2018). As antenas de leitor funcionaram satisfatoriamente com o fator de qualidade desejado (para leitores o fator de qualidade precisa ter um valor específico, de forma a gerar atenuação em uma faixa de frequências que não seja muito estreita, mas que também não seja muito larga, a ponto de ser insuficientemente intensa) após a impressão de seis camadas de tinta, apresentando leituras a distância máxima de 11,1 cm ao utilizarem uma potência de saída de 33 dBm. Foi utilizado um sistema multi antenas, o que possibilitou o procedimento de posicionamento (estimativa da posição de uma tag por múltiplas leituras da mesma, com diferentes intensidades, por mais de uma antena do leitor, o que permite triangulação). Embora o sistema tenha apresentado viabilidade, e até uma pequena redução no custo em relação a um sistema elaborado com cobre, foram necessárias seis camadas de impressão para construir um sistema funcional, o que adiciona complexidade ao processo de fabricação. A forma sugerida pelos autores para aumentar a viabilidade desse tipo de instrumento produzido nesses moldes é a implementação de tintas com condutividade mais alta (nanopartículas de prata), ou técnicas de impressão que resultem em filmes mais grossos com apenas uma impressão.

Um trabalho reportou a fabricação de um sistema multi-sensores com comunicação NFC impresso por ink-jet, cujo o arranjo de circuitos e antena RFID - HF foram impressos por serigrafia utilizando uma tinta à base de micro flocos de prata (pasta 5064 da DuPont). A resistência de folha da trilha impressa por serigrafia foi de 12 mΩ/sq com espessura típica de 6 μm por camada, para uma tela SD40/25, o que garantiu uma antena com resistência elétrica de 50 Ω. Foram utilizadas duas camadas de tinta à base de prata e três camadas de uma tinta dielétrica, a camada dielétrica torna possível imprimir linhas de prata até contatos da antena que atravessassem os locais em que a trilha da antena se encontrava. Os autores alertam que caso fosse necessária uma antena com menor resistência total haveria a possibilidade da impressão ser realizada com telas de maior lineatura (Quintero et al., 2016).

Nesse trabalho as antenas impressas tiveram cada uma de suas camadas curadas em uma estufa a 150 °C por 30 minutos, e o arranjo ficou com uma espessura de 35 ± 4 μm. A antena RFID elaborada possui formato quadrado com 5 espiras, e o tuning para a frequência de 13,56 MHz é obtido com a capacitância interna de um IC de 27,5 pF. Os sensores incorporados são um sensor de umidade (detecção de vapor capacitiva), dois de detecção de vapor resistiva (para detectar amônia por exemplo) com capacidade de aquecimento e um canal resistivo para detecção de temperatura (RTD). Além da leitura sem fio, o banco de sensores também possui uma entrada direta para conexão e leitura. Tanto o dispositivo de comunicação RFID quanto os sensores demonstraram resultados satisfatórios quando testados para detecção de temperatura, umidade e níveis de amônia.

Um projeto de antena RFID - HF com conexão por campo distante, impressa por serigrafia utilizando uma tinta de nanopartículas de prata (Novacentrix (PChem) ink), também foi testado com sucesso (Li, M. et al., 2018). Nesse caso particular a antena é de campo elétrico de grande área e possui um diodo orgânico impresso que funciona como retificador, provendo uma tensão de aproximadamente 1 V dc para uma entrada de 1 W a distância de poucos metros. O diodo também já age como capacitor para realizar o ajuste de impedância na antena. O sistema possui dimensões de 400 mm x 600 mm, é totalmente impresso e teve desempenho satisfatório em todos os testes de captura de energia de sinais a 13,56 MHz.

Caracterizações físicas e elétricas de duas tintas à base de prata para ink-jet (Sun Tronic U5603 e DGP 40LT15C) e uma tinta também à base de prata para

serigrafia (Sun Tronic CRSN 2442) impressas em 3 substratos (Kapton HN, PET e PEI) foram acessadas em um ensaio que tinha como objetivo otimizar as técnicas e materiais de fabricação de antenas RFID - HF (Salmeron et al., 2012). Foram realizadas medidas de espessura e rugosidade dos substratos e dos padrões impressos com diferentes números de camadas de ink-jet e com telas de diferentes números de fios no caso da impressão pelo processo de serigrafia. No trabalho em questão os resultados experimentais das impressões em ink-jet foram comparados com um modelo teórico que considerava as condições de impressão e formulação da tinta. Uma caracterização elétrica DC foi realizada para identificar as resistências de folha de todas as combinações estudadas, e utilizando a tinta Sun Tronic U5603 impressa em substrato PEI, foi impresso e testado com sucesso um indutor/antena RFID - HF.

O estudo revelou que o modelo utilizado pelos autores para prever a espessura dos substratos em ink-jet possui boa compatibilidade com os resultados experimentais. Também foi possível determinar com esse trabalho que a impressão de antenas mais grossas por ink-jet (através da impressão de várias camadas) é viável, já que a rugosidade superficial em impressão multi camada não muda em relação a impressão de apenas uma camada. A impressão de 4 camadas foi suficiente para atingir patamares de resistência de folha aceitáveis para a produção de indutores com a tinta Sun Tronic para ink-jet. Os melhores resultados de condutividade em ink-jet foram obtidos na impressão da tinta DGP em PEI, porém os melhores resultados de resolução e espessura foram obtidos com a tinta Sun Tronic impressa sobre PEI.

No caso da impressão por serigrafia, foi estabelecido que espessura e condutância têm relação direta com o número de fios (quanto maior o número de fios menor a espessura e condutância). Os padrões impressos por esse método tiveram maior condutância, menor resolução e maior rugosidade do que os padrões impressos por ink-jet. Dessa forma a técnica de serigrafia se demonstrou viável para a produção de indutores RFID - HF, porém o trabalho também estabeleceu que a baixa resolução característica desse método deve ser considerada no dimensionamento dos indutores (principalmente no dimensionamento dos gaps entres as espiras).

Um estudo avaliou como procedimentos posteriores a impressão de antenas RFID - HF em PET por serigrafia interferiram na performance das antenas e nas

características elétricas das trilhas impressas. Nesse estudo foram utilizadas uma pasta à base de prata comercial (DuPont 5029) e uma pasta semelhante fabricada pelos autores (Sun *et al.*, 2019). A condutividade elétrica apresentou um aumento de duas vezes com a utilização de um dos tratamentos térmicos testados, quando comparada com a condutividade atingida utilizando o processo de cura indicado pelo fabricante da tinta. O tratamento térmico em questão funcionou de forma semelhante para ambas as tintas e consiste em realizar uma pré secagem das tintas a temperatura ambiente por 24 horas e em seguida aquecer o conjunto a 120 °C por 120 minutos. Porém considerando os problemas de processo que um procedimento de cura tão longo causaria, vale ressaltar que uma pré secagem a 60 °C com duração entre 5 a 10 minutos ofereceu a maior parte dos benefícios (melhora da condutividade e fator de qualidade das antenas) da secagem a temperatura ambiente por 24 horas.

A tinta elaborada pelos autores do estudo necessitou de um período de cura a 120 °C mais curto que a tinta da DuPont (30 minutos contra 120 minutos) e as antenas impressas com essa tinta apresentaram menor resistência e maior fator de qualidade do que as antenas impressas com a tinta comercial. Um fator de qualidade de mais de 7,5 foi atingido por antenas RFID - HF com o tamanho de um cartão de crédito impresso em PET ou papel, utilizando a tinta não comercial e um processo de pré secagem a 60 °C por 5 minutos seguido de uma cura a 120 °C por 30 min.

Um trabalho comparou a performance de dois padrões de antenas RFID - HF e três de antenas RFID - UHF, construídas com tecnologia PCB em um laminado FR4 metalizado com cobre, com esses mesmos padrões impressos pela técnica de ink-jet para uma tinta não orgânica de nanopartículas de prata (Suntronic U5603) sobre substratos de PET, Kapton e FR4 (Tarapata; Paczesny; Kawecki, 2013). As antenas foram impressas com sucesso utilizando uma impressora Dimatix DMP 2832, os padrões RFID - HF tiveram a necessidade de impressão de uma camada dielétrica entre o padrão da bobina e a ponte que conecta os seus terminais, o que aumentou a complexidade do processo e causou complicações. Esses mesmos padrões HF, devido à alta razão de aspecto, também trouxeram a necessidade de deposição de mais de 5 camadas de tinta condutora para atingirem resistências totais aceitáveis.

As antenas UHF não tiveram os mesmos problemas dos padrões HF, o que demonstra que a técnica utilizada é mais viável para a tecnologia UHF. Ao final do trabalho, a distância de leitura das antenas impressas foi comparada com seus análogos produzidos em cobre, e em todos os casos a distância de leitura das antenas impressas foi menor.

Um dos trabalhos encontrados avaliou dois métodos de condensação das microestruturas condutoras (compressão térmica e revenimento por infravermelho) em três tintas à base de prata para serigrafia (DuPont 5029, Henkel PM406 e XEROX) como uma forma de melhorar o fator de qualidade de antenas RFID - HF impressas com essas tintas (Xiao et al., 2018). Tanto a compressão térmica quanto o revenimento por infravermelho se mostraram eficientes na densificação dos condutores dos perfis impressos, o que reduziu as resistências das trilhas em três vezes com compressão térmica e em medidas significativas e diferentes para cada tinta com o recozimento por infravermelho. A diminuição da resistência total das antenas, causada pelos procedimentos de densificação dos condutores, levou a uma melhoria significativa dos fatores de qualidade das mesmas.

3. MATERIAIS E MÉTODOS:

Seguem descritos os materiais e métodos utilizados para o dimensionamento e testagem das antenas, e nas análises necessárias para a otimização da PCT:

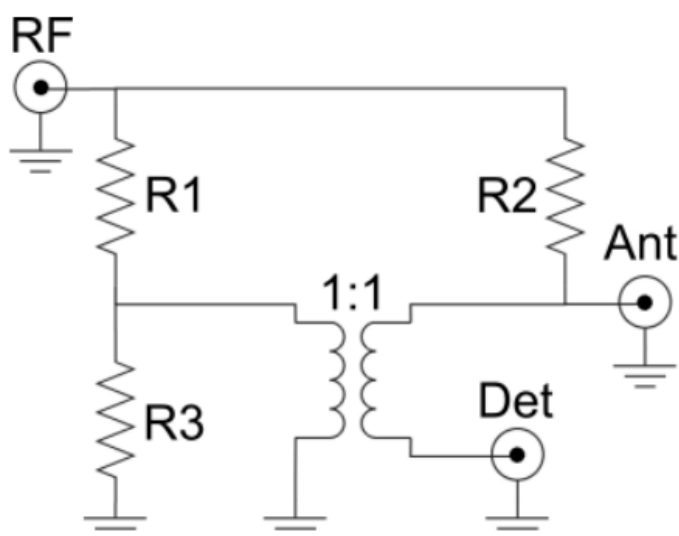
3.1 Aparato experimental para tuning e testagem das antenas:

Para que fosse possível acessar as frequências de atenuação e testar o funcionamento das antenas elaboradas nesse estudo foi necessária a elaboração de aparatos experimentais que seguem descritos nessa seção.

3.1.1 Ponte de reflexão ou ponte de perda de retorno:

Para medir a frequência de ressonância das tags elaboradas no laboratório, processo essencial para realizar o tuning com adição de capacitores externos, foi utilizado um aparato experimental elaborado e montado pelo colega de laboratório Guilherme Rodrigues de Lima, que consiste no seguinte circuito elétrico:

Figura 4 - Esquema elétrico da ponte de reflexão.



Fonte: HAYWARD, Wes; CAMPBELL, Rick; LARKIN, Bob. Experimental Methods in RF. 1. ed. revisada : Amer Radio Relay League, 2009

No diagrama apresentado na figura 4 temos a representação da saída “Ant” que consiste em um indutor/antena, é sobre esse componente que devem ser

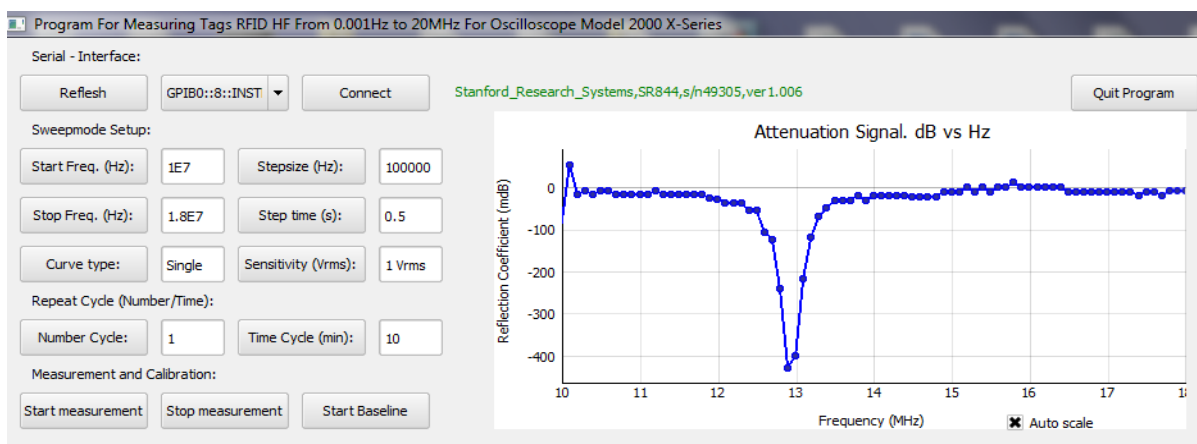
posicionadas as tags a serem medidas para que haja o acoplamento indutivo. Nesse mesmo diagrama a saída “RF” é acoplada a um gerador de radiofrequência, e a saída “Det” a um leitor de tensão, ambos oriundos de um Lock-In SR844. O Lock-in, controlado através de uma porta GPIB por um programa de gerenciamento e aquisição de dados chamado de “*Program For Attenuation Meansuring Tags RFID HF for Lock-In SR844*” faz uma varredura de sinais entre as frequências de 10 MHz e 20 MHz.

Figura 5 - Fotografia do Lock-In SR844.



Fonte: Elaboração própria

Figura 6 - Programa de controle do lock-in.



Fonte: Elaboração própria

A aquisição dos dados consiste em inicialmente coletar a tensão em “Det” sem a aproximação da tag que se deseja medir, neste momento será salva uma linha de base para cada frequência, posteriormente a tag é colocada sobre o indutor em “Ant” e é realizada uma segunda medida, o programa compara a linha de base com a segunda medida e salva a atenuação resultante da tag para o espectro de frequências em um documento de texto. O comparativo entre a linha de base e a

linha traçada no momento em que a tag está posicionada na saída “Ant” é feito na escala de decibéis (dB), que possui a forma:

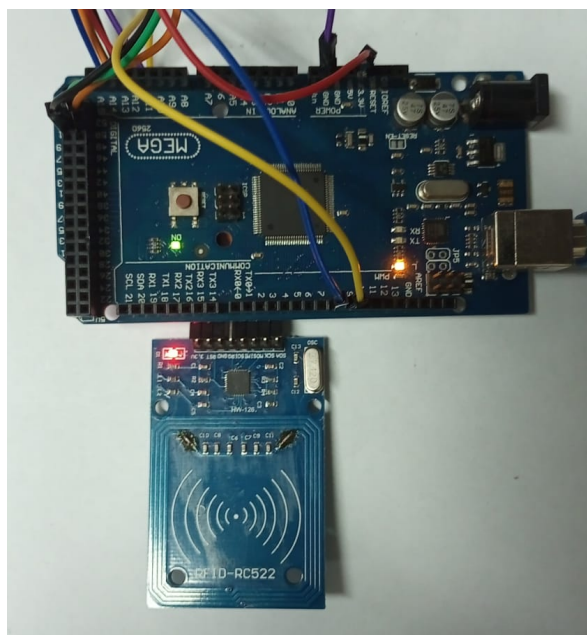
$$A = 10 \log_{10} \frac{P_1}{P_2} \text{ dB} \quad (2)$$

Considerando “A” como o valor de atenuação registrado para cada dada frequência, P_1 como a intensidade do sinal medido com a antena posicionada na saída “Ant” e P_2 como a intensidade do sinal da linha de base. Nesse espectro de atenuação por frequência é possível visualizar tanto a frequência de atenuação máxima da tag, como a largura do perfil de atenuação que é inversamente proporcional ao fator de qualidade da mesma.

3.1.2 Detecção Rfid:

Para realizar o teste definitivo de leitura do CI utilizando as antenas produzidas no laboratório, foi utilizado um módulo de detecção RFID RC522 ligado em conjunto com um arduino MEGA. O módulo RFID é um sistema composto por uma antena e um circuito de interpretação que recebe e armazena os dados de um token (relativo a tag RFID sendo lida). Para realizar a interface com o arduino e imprimir os códigos lidos pela antena na porta serial, foi carregado o programa que está disponível no apêndice A.

Figura 7 - Arranjo Arduino MEGA e módulo RC 522 para detecção RFID.



Fonte: Elaboração própria

Esse programa permite detecção do código de tags RFID em arduino UNO/NANO e MEGA, a única modificação necessária para utilizar o mesmo em um arduino UNO/NANO seria na definição das entradas no trecho “ #define SDA_DIO 9 #define RESET_DIO 8 ” para as entradas do novo arranjo. Considerando esse programa as entradas do arduino devem ser conectados ao módulo da seguinte forma:

Tabela 1 - Ligações do arranjo arduino-módulo RFID.

Pino no módulo RC 522	Entrada no Arduino UNO/NANO	Entrada no Arduino MEGA
SDA	D10	D9
SCK	D13	D52
MOSI	D11	D51
MISO	D12	D50
IRQ	não conectado	não conectado
GND	GND	GND
RST	D9	D8
3.3V	3.3V	3.3V

Fonte: Elaboração própria

Montado o arranjo, as antenas são então aproximadas do módulo até que seja possível visualizar o seu código sendo exibido na porta serial. Esse aparato também foi utilizado para a realização do ensaio de resistência elétrica máxima e fator de qualidade, e também para o ensaio de força eletromotriz induzida, sendo utilizado como fonte de sinal para a indução de força eletromotriz nas antenas.

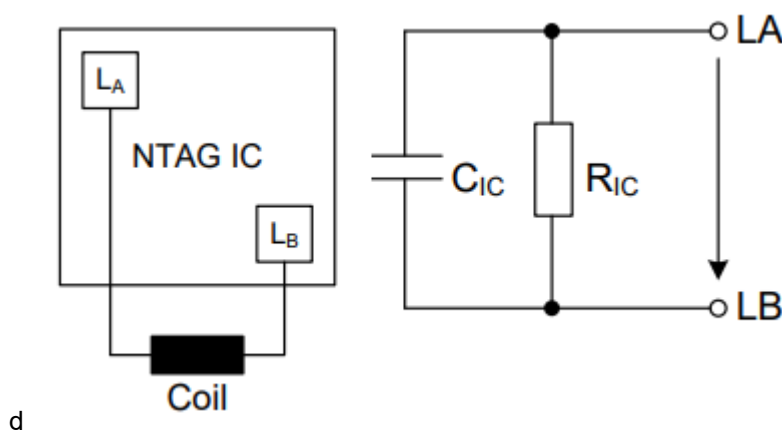
3.2 Dimensionamento das antenas e produção de antenas:

Para descobrir formas viáveis para as antenas a serem construídas com as pastas condutoras alguns processos e ensaios foram realizados utilizando antenas fabricadas em cobre e esses processos estão descritos nesta sessão:

3.2.1 Projeto das antenas para o CI NXP NTAG213:

A consulta da ficha técnica do CI NXP NTAG213 selecionado para a ser integrado nas antenas revelou uma referência de um guia de desenvolvimento de antenas para esse CI intitulado AN 11276 NTAG Antenna Design Guide. No guia podemos constatar que o CI escolhido possui apenas duas entradas LA e LB que devem ser conectadas as extremidades do indutor\antena, podemos também considerar o CI como um circuito capacitor resistor com forma representada na figura 8:

Figura 8 - Diagrama esquemático e circuito equivalente do CI NXP NTAG213.



Fonte: AN 11276 NTAG Antenna Design Guide

A capacitância do CI escolhido é apresentada em sua ficha técnica e possui valor de 50 pF, essa informação é de extrema importância já que todo dimensionamento da antena depende da capacitância interna do CI. No manual a sugestão que recebemos é de minimizar a capacitância da tag o quanto possível, buscando formas de minimizar a capacitância de conexão com o CI e da antena em si, porém considerando a necessidade de diminuir a razão de aspecto total das antenas essa recomendação não foi seguida à risca.

O manual também acessa características como o tamanho da antena, explicando que ela varia de acordo com a aplicação, considerando o sensor adquirido para os testes de leitura, passamos a dimensionar as antenas com tamanhos próximos ao tamanho da antena do leitor, já que isso potencializa a indução magnética.

O gap entre as espiras deve ter o menor tamanho possível permitido pelo processo de fabricação, de forma a ampliar a performance das antenas. O manual também informa que no caso de antenas impressas a sugestão é de a espessura do filme impresso ser a mais alta possível. A largura das trilhas é indicada como um parâmetro a ser usado para ajuste fino da indutância, finalmente o manual sugere ensaios de otimização de antenas considerando projetos que orbitem a indutância da antena desenhada em mais ou menos 30, 20 e 10 por cento, de forma a avaliar a performance destas e estabelecer o formato com melhor performance.

Para elaborar o formato das antenas foi utilizado um software de dimensionamento de antenas disponibilizado gratuitamente online pela empresa Nuvoton. A prototipagem das antenas foi realizada tendo o objetivo de produzir antenas com a menor razão de aspecto possível, com o objetivo de diminuir a resistência elétrica final da antena, já que as pastas condutoras possuem resistividade maior do que a dos metais usualmente utilizados nas TAGs comerciais. Logo após o dimensionamento das antenas foi gerado um arquivo de texto para PCB no software de design, arquivo este que foi convertido para imagem utilizando um conversor de texto para imagem disponível online.

3.2.2 Produção de antenas em cobre:

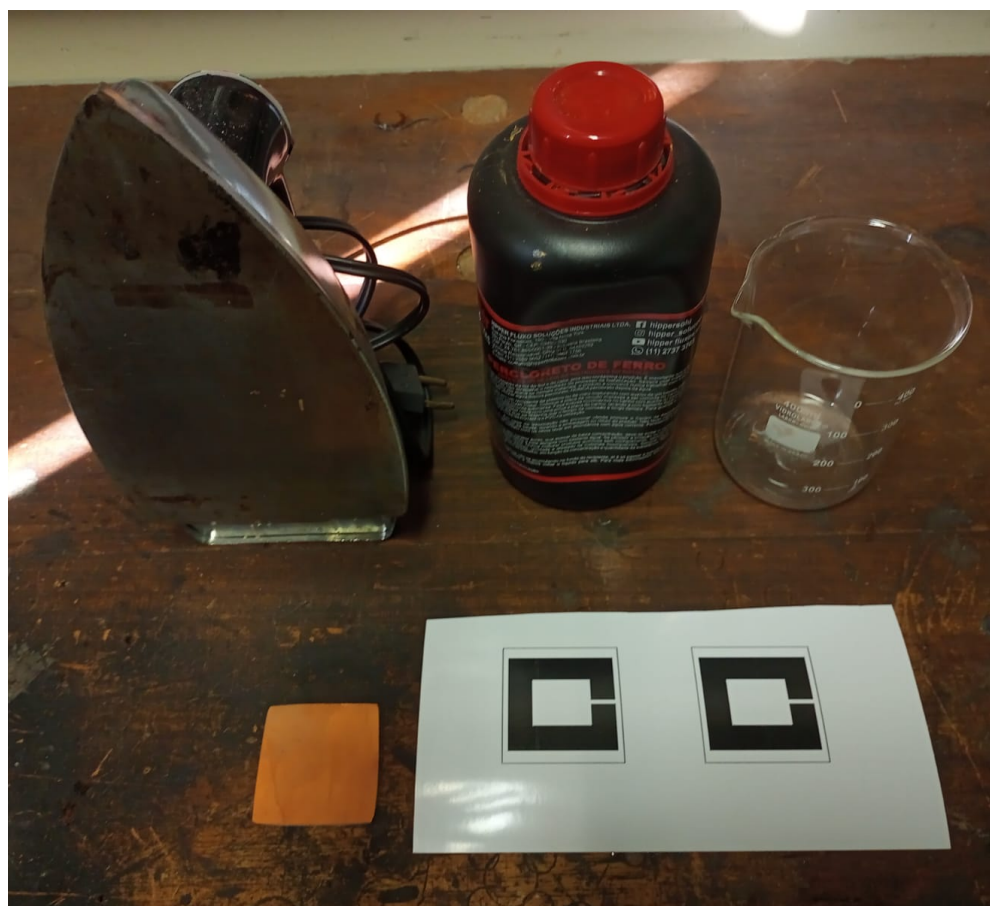
A produção de antenas de cobre começa com a impressão do design selecionado em papel glossy, utilizando uma impressora a laser. O design é então

fixado sobre uma placa de fenolite cobreada, e passando repetidas vezes um ferro de passar roupa em temperatura alta sobre as costas do papel glossy, o toner é transferido para a placa de fenolite cobreada.

A placa de fenolite com design impresso é então imersa em um becker contendo percloreto de ferro, o becker é agitado até que seja possível ver que todo o cobre exposto foi corroído, a antena é então lavada com água corrente em abundância e o toner é retirado utilizando palha de aço.

Os fios que permitem conexão de circuito integrado e demais componentes com a antena são então soldados nas suas extremidades, utilizando um ferro de solda e fio estanho para solda. Os componentes são então soldados aos fios conectados às antenas utilizando também o ferro de solda e fio de estanho para solda.

Figura 9 - Materiais para a produção de antenas em cobre.



Fonte: Elaboração própria

3.2.3 Ensaio de capacitância externa:

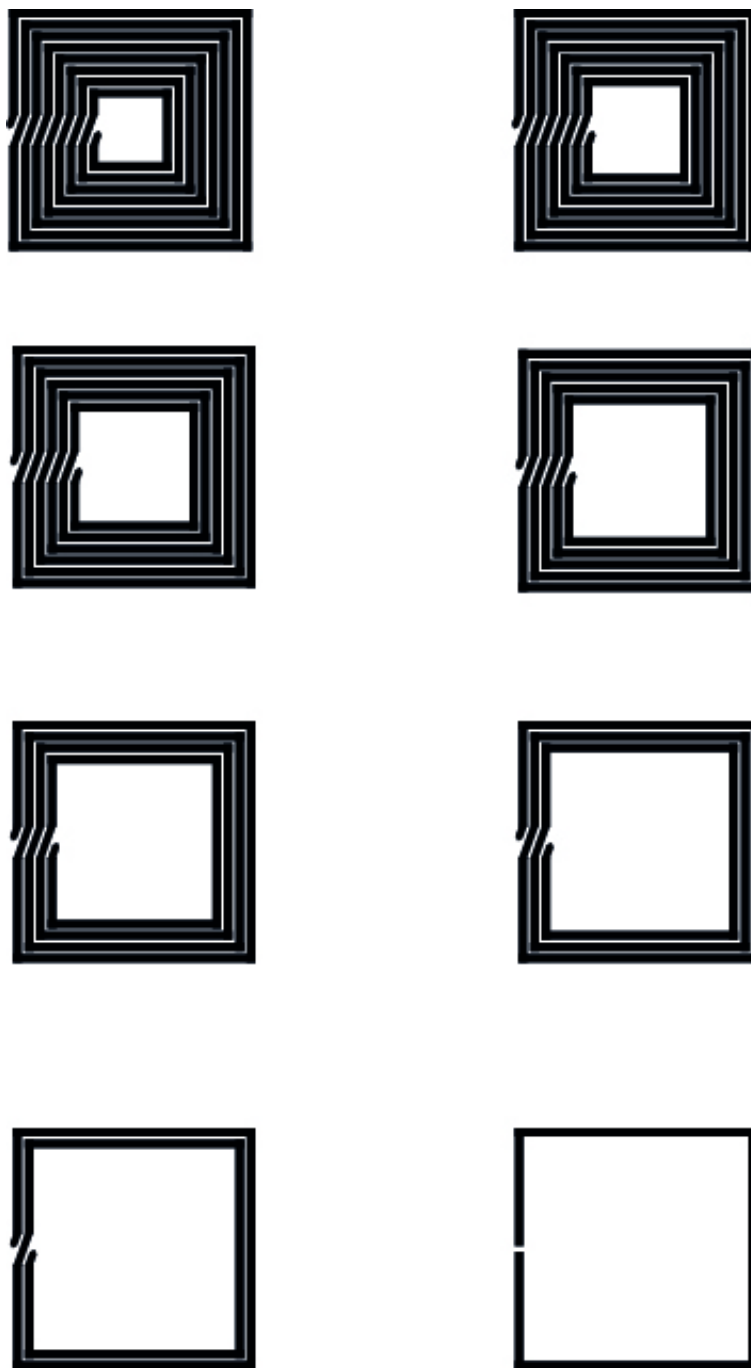
O não funcionamento das antenas de baixa razão de aspecto, que será apresentado nos resultados, levou à hipótese de que a capacitância externa teria um valor máximo permitido, isso nos levou a elaborar um ensaio de capacitância máxima. Nesse ensaio, utilizando as dimensões do leitor de RFID como parâmetro para o tamanho máximo das antenas (40x40 mm), foi elaborada uma antena de mínima razão de aspecto com indutância teórica de 2,753 μH , o que permitiria que o fenômeno de ressonância ocorresse na frequência desejada de 13,56 MHz, utilizando apenas a capacitância interna do CI selecionado. O design desta antena contava com oito espiras, para acessar a capacitância externa máxima então foram subtraídas uma a uma as espiras das antenas, de forma a reduzirmos progressivamente a indutância das mesmas, para que estas fossem testadas na ponte de reflexão e leitor RFID acopladas a capacitores progressivamente maiores. Na tabela 2 consta a relação das indutâncias e capacitâncias das antenas planejadas e a imagem contendo os designs já prontos é exibida na figura 10.

Tabela 2 - Características das antenas do ensaio de capacitância externa.

Número de espiras	Indutância da antena (μH)	Capacitância necessária (CI + capacitor externo) (pF)
8	2,753	50
7	2,400	57,4
6	2,007	68,6
5	1,592	86,5
4	1,172	117,5
3	0,770	178,9
2	0,413	333,9
1	0,135	1019,9

Fonte: Elaboração própria

Figura 10 - Designs das antenas do ensaio de capacitância máxima.



Fonte: Elaboração própria

3.2.4 Ensaio de força eletromotriz gerada nas antenas:

Para descobrir a relação entre a mudança no número de espiras das antenas com a força eletromotriz gerada nas mesmas foram realizadas medidas da força eletromotriz nas antenas elaboradas no ensaio de capacitância máxima, utilizando um osciloscópio MINIPA MO-2150. A força eletromotriz é acessada ao suspender as antenas, conectadas às saídas do osciloscópio, sobre o arranjo de detecção RFID. A

tela do osciloscópio apresenta o sinal elétrico presente na trilha das antenas e a força eletromotriz eficaz é calculada utilizando a relação:

$$E_{ef} = \frac{E_{max}}{\sqrt{2}} \quad (4)$$

Sendo E_{ef} a força eletromotriz eficaz e E_{max} a força eletromotriz máxima.

3.2.5 Ensaio de resistência elétrica e fator de qualidade:

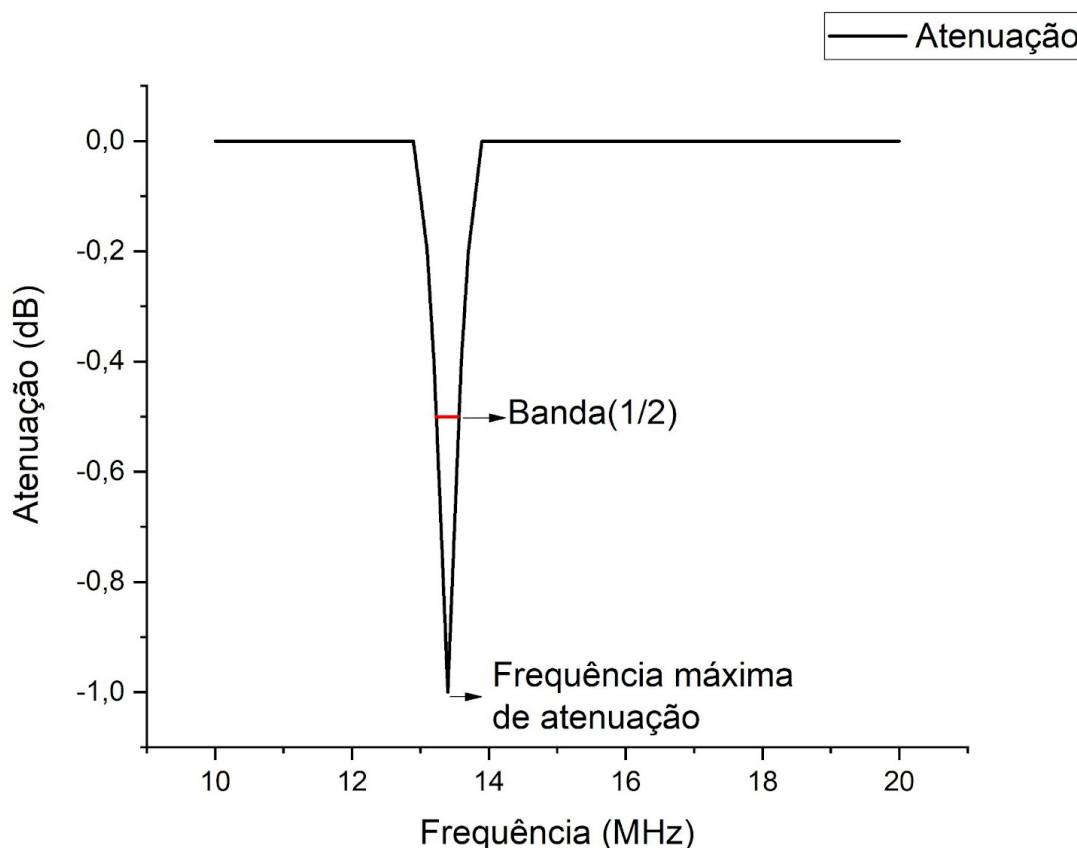
Para descobrir a resistência elétrica máxima possível das antenas em que ainda fosse possível realizar leituras no dispositivo de detecção de RFID foram conectados em série com o indutor das antenas resistores com valores progressivamente maiores. Os arranjos de indutor e resistores progressivamente maiores foram então testados para detecção sobre o leitor de RFID até que não fosse mais possível realizá-la, a resistência máxima em que ainda foi possível realizar a leitura foi então registrada.

Para o funcionamento das antenas RFID o fator de qualidade das mesmas tem um valor mínimo possível, como esse parâmetro é inversamente proporcional a resistência elétrica, imaginamos que a degradação deste fator é o que ocasiona o não funcionamento das antenas com o aumento da resistência. Dessa forma as antenas ligadas aos resistores passaram por um processo de medição de seu fator de qualidade, processo este que envolve medir a atenuação destas antenas na ponte de reflexão e posteriormente calcula-lo utilizando a seguinte relação:

$$Q = \frac{f}{Banda(1/2)} \quad (3)$$

Sendo Q o fator de qualidade, f a frequência máxima de atenuação e Banda(1/2) a banda de frequência que possui metade da intensidade da frequência de máxima atenuação. A figura 11 apresenta os componentes dessa medida.

Figura 11 - Exemplo de medida de fator de qualidade.



Fonte: Elaboração própria

3.3 Ensaios relativos às pastas condutoras e impressão de antenas:

Para acessar características essenciais ao bom funcionamento e durabilidade de antenas construídas com diferentes pastas condutoras, as pastas devem ser testadas para adesão e condutividade, nessa seção os materiais e processos utilizados para esse fim são descritos, junto dos procedimentos de impressão de antenas.

3.3.1 Ensaio de adesão:

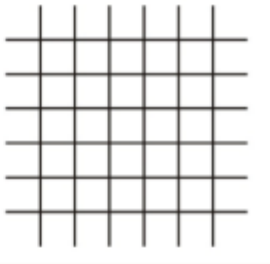
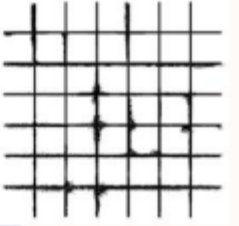
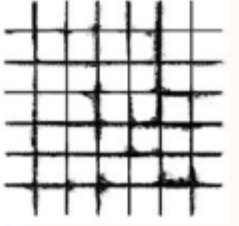
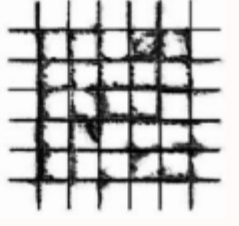
No presente projeto vários substratos e formulações de PCT foram considerados, e para acessar a viabilidade de cada formulação em cada substrato foi necessária a utilização de um teste de adesão, o formato utilizado foi método b (corte em grade) presente na norma abnt NBR 11003:2009. Neste método são utilizados um cortador de seis lâminas afastadas em 2 mm cada uma, fita adesiva

com largura de 25 mm e espessura de 0,2 mm com adesão ao aço mínima de 55 kgf/mm e resistência a tração mínima de 4,6 kgf/mm, lupa com aumento de sete vezes, uma borracha e pincel de cerdas macias. Para a realização desses ensaios foi adquirido o kit de medida da empresa ISOLABOR Modelo 185-02, descrito como: Aparelho para teste de aderência Corte Cruzado com lâmina de 2 mm, acompanha estojo com lupa, escova e fita adesiva. Conforme Norma ASTM 3002/ 3359 DIN 53151/NBR-11003/09. OMICRON NCM 9024.10.20.

A execução do ensaio começa com dois cortes perpendiculares sobrepostos na área pintada, utilizando o cortador formando um padrão quadriculado de 5x5, devemos então, com o auxílio da lupa observar se o substrato foi atingido na totalidade dos cortes na área quadriculada. O próximo passo consiste em remover os resíduos de tinta utilizando o pincel de cerdas macias, retiramos então uma volta completa da fita adesiva especificada e descartamos, para a realização do teste são retirados 10 cm de fita que é aplicada sobre a área quadriculada em um dos sentidos dos cortes.

Assim que a fita é aplicada ela deve ser alisada primeiramente com o dedo e posteriormente com o auxílio da borracha de maneira a garantir que a fita fique integralmente aderida a área quadriculada, a fita deve então ser removida no intervalo entre 1 e 2 minutos após a sua aplicação, com uma puxada firme de velocidade aproximada de 20 cm/s em um ângulo tão próximo de 180° quanto possível, neste momento devemos realizar a avaliação da adesão baseado na área destacada de acordo com as diretrizes expostas na figura 12.

Figura 12 - Classificação de adesão da norma ABNT NBR 11003:2009 baseada no destacamento da tinta dentro da área quadriculada.

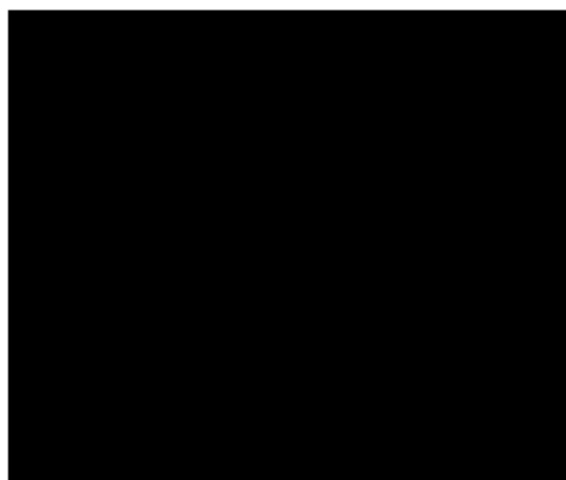
Código	Figura
Gr₀ Nenhuma área da película destacada	
Gr₁ Área da película destacada, cerca de 5 % da área quadriculada	
Gr₂ Área da película destacada, cerca de 15 % da área quadriculada	
Gr₃ Área da película destacada, cerca de 35 % da área quadriculada	
Gr₄ Área da película destacada, cerca de 65 % da área quadriculada	

Fonte: Norma ABNT NBR 11003:2009

3.3.2 Ensaio de resistência de folha:

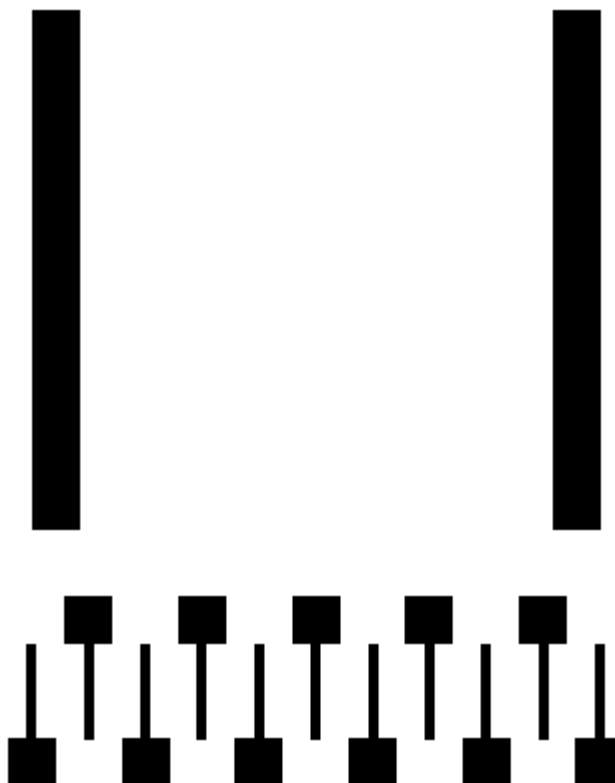
Para acessar as resistências de folha das diferentes formulações de PCT elaboradas durante o andamento do projeto, foi construído um ensaio que consiste na impressão de formas de PCT, utilizando o processo de serigrafia, e posterior deposição de eletrodos de PTF, também utilizando o processo de serigrafia, sobre as formas de PCT, para que fosse possível realizar contato com os instrumentos de medida de resistência elétrica. A figura 13 apresenta o design elaborado para a tela de impressão de PCT e a figura 14 o design para a tela de impressão dos eletrodos de tinta prata.

Figura 13 - Esquema da tela para impressão do perfil de PCT utilizado no ensaio de resistência de folha.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 14 - Esquema da tela para impressão de eletrodos de pasta prata do ensaio de resistência de folha.



Fonte: Elaboração própria.

As telas possuem lineatura de 150 fios/cm para PCT e 120 fios/cm para PTF, após a impressão das duas formas sobrepostas, temos um quadrado de 50 mm de lado de PCT entre os eletrodos de prata na parte de cima do ensaio (que normalmente é também aproveitado para ensaios de tempo de vida) e 10 quadrados de 5 mm de lado na parte inferior do ensaio que serão utilizados para medir a resistência para razões de aspecto de 1 a 10. Em posse dessas medidas de resistência é possível elaborar um gráfico de resistência por razão de aspecto e utilizar seu coeficiente angular como medida de resistência de folha, e seu coeficiente linear pode ser interpretado como a resistência de contato.

3.3.3 Produção de antenas impressas:

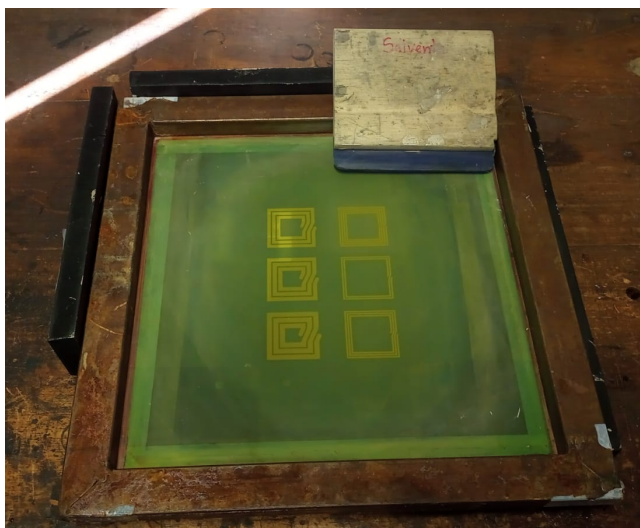
O processo de produção de antenas impressas começa com a limpeza dos substratos, que é realizada com a imersão dos substratos em álcool isopropílico,

utilizando um becker como recipiente. O becker é então colocado em um banho ultrassônico por 10 minutos, os substratos são então retirados utilizando uma pinça metálica e então deixados para secar sobre um pano descartável.

Após a limpeza dos substratos, estes são fixados em uma plataforma preparada para a impressão serigráfica utilizando fita adesiva, a tela contendo o design da antena é então posicionada sobre a plataforma, a tinta escolhida é espalhada sobre a tela utilizando um rodo. Assim que o design estiver todo coberto pela tinta escolhida, utilizando uma passagem de rodo com pressão suficiente para que a tela toque o substrato a tinta é transferida para o mesmo. Após a impressão a antena é colocada em uma estufa para secagem na temperatura de 120 °C por 30 minutos.

Os fios que permitem conexão com a antena para integração com o circuito integrado e capacitores são então colocados sobre as suas extremidades, e utilizando uma espátula, pasta condutora prata é depositada sobre a extremidade desencapada do fio, garantindo contato entre a antena e o fio, os demais componentes são então soldados aos fios conectados as antenas utilizando um ferro de solda e fio de estanho para solda.

Figura 15 - Materiais para a produção de antenas impressas.



Fonte: Elaboração própria

3.4 Tags e conexão com o CI:

Para realizar a testagem das antenas, obtivemos os CIs através de tags comerciais inteiras, o modelo de tag utilizado é o exibido na figura 16:

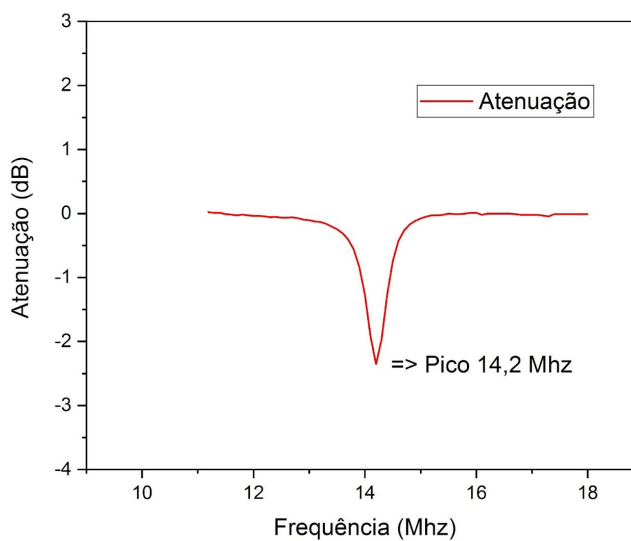
Figura 16 - Tag RFID utilizada para a extração do CI NXP NTAG 213.



Fonte: Elaboração própria.

O perfil de atenuação das tags comerciais compradas foi medido na ponte de reflexão para ser usado como comparativo:

Figura 17 - Perfil de atenuação das tags comerciais.



Fonte: Elaboração própria

Podemos notar na figura 17 que a frequência de atenuação medida é diferente da frequência nominal presente no datasheet de 13,56 MHz. O procedimento de extração do CI consiste em recortar a região que contém as abas ao qual o CI foi pressionado, retirar a cola utilizando acetona e um pedaço de algodão e então fixar o CI por pressão no arranjo da figura 18:

Figura 18 - Arranjo de conexão do CI.



C

Fonte: Elaboração própria.

Nesse arranjo dois conectores retráteis pressionam as abas de alumínio que estão conectadas ao CI, os conectores estão conectados a dois fios que podem ser acoplados as antenas com um ponta de jumper para prototipagem.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos durante a execução do trabalho. A pesquisa foi realizada em várias frentes, já que avanços em cada uma dessas frentes contribuem para um produto final viável. Para melhor compreensão, os resultados de cada uma dessas frentes foram apresentados separadamente. As frentes de trabalho são: o estudo de formas não usuais para antenas (seção 4.1), impressão e teste de antenas fabricadas com pasta polimérica à base de prata, ensaios de otimização da pasta condutora transparente e ensaios de aumento de indutância utilizando materiais de alta permeabilidade na composição de núcleos de indutores impressos.

4.1 Antenas fabricadas em cobre:

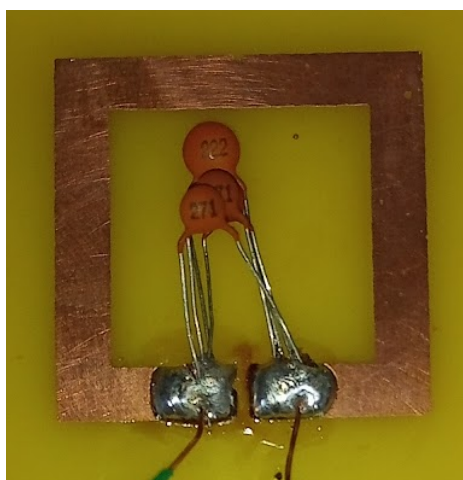
A primeira etapa do trabalho envolve verificar se as estratégias de elaboração das formas antenas são de fato funcionais, já que estas diferem das formas usualmente utilizadas na produção de dispositivos RFID. Para testar especificamente a forma das antenas, o material e o meio de produção das mesmas deve ser química e mecanicamente estável e confiável, dessa forma as antenas foram construídas em cobre utilizando o método de corrosão de placas de fenolite cobreadas. Os designs das antenas foram impressos nas placas cobreadas utilizando termografia, e posteriormente as placas foram mergulhadas em percloroeto de ferro, para que as partes expostas fossem corroídas.

4.1.1 Antenas de mínima razão de aspecto:

Como as pastas condutoras possuem alta resistência de folha, a primeira tentativa de construção de antenas foi elaborar uma antena de baixíssima razão de aspecto utilizando o software da Nuvoton. Em seguida esses indutores foram acoplados a capacitores comerciais com a capacitância necessária para que houvesse o fenômeno de ressonância na faixa de frequência de 13,56 MHz e essas antenas então tiveram sua atenuação medida na ponte de reflexão. A medida de atenuação revelou que a capacitância sugerida pelo software da Nuvoton (2,2 nF) não causa atenuação na faixa esperada, dessa forma a capacitância foi corrigida

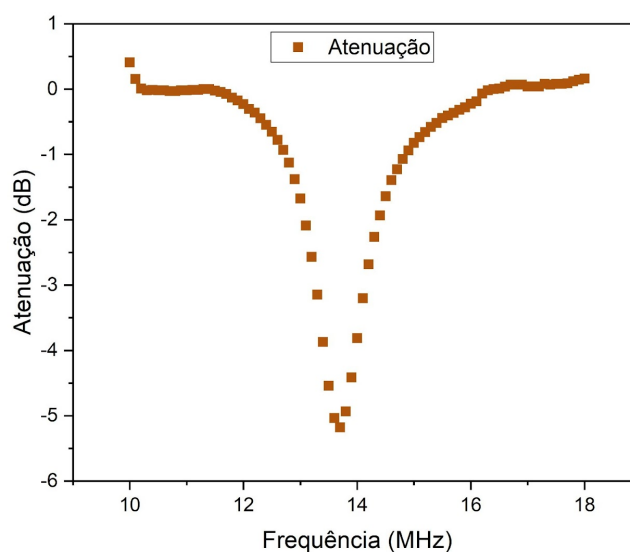
(3,2 nF) e novas medidas de atenuação foram realizadas, resultando em atenuação na faixa esperada, um exemplo de antena de cobre é exibido na figura 19 e seu espectro de atenuação é exibido na figura 20.

Figura 19 - Antena de cobre.



Fonte: Elaboração própria

Figura 20 - Gráfico da curva de atenuação da antena de cobre acoplada ao capacitor de 3,2 nF.



Fonte: Elaboração própria

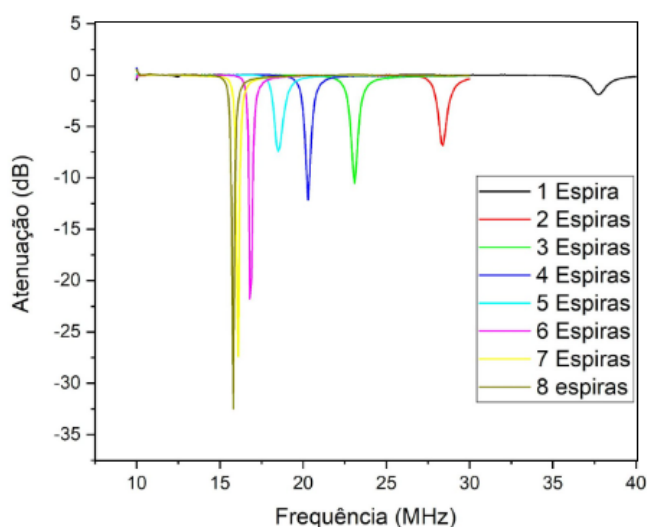
O perfil de atenuação com pico em 13,8 MHz e atenuação de -5 dB seria suficientemente intenso e exato para levar ao funcionamento da tag, se compararmos com o perfil de atenuação da tag comercial, porém ao conectarmos as

antenas a um circuito integrado extraído de uma antena comercial e realizarmos o teste de leitura RFID não obtivemos leituras. A estratégia de acoplamento com o CI foi montada e revisada várias vezes, não obtendo resultado, uma antena comercial foi conectada ao CI e então obtivemos resultados positivos no teste de leitura, isso demonstrou que o problema estava na antena de baixa razão de aspecto construída em cobre. A estratégia adotada para solucionar esse problema foi o ensaio de capacitância externa máxima.

4.1.2 Ensaio de capacitância externa:

Oito antenas, conectadas apenas a um capacitor externo de 50 pF, tiveram sua atenuação medida na ponte de reflexão, os resultados das intensidades e frequências de atenuação dessas antenas estão expostos na figura 21. A capacitância necessária para que todas as antenas tenham atenuação na frequência ideal de 13,56 MHz foi calculada de acordo com as medições na ponte de reflexão e está disposta na coluna da direita da tabela 3, junto dos valores de frequência expostos na figura 21.

Figura 21 - Atenuação das antenas ligadas ao capacitor de 50 pF.



Fonte: Elaboração própria

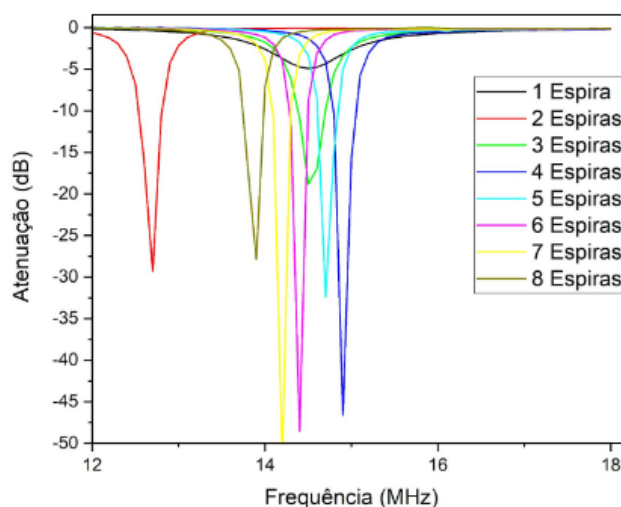
Tabela 3 - Características das antenas do ensaio de capacitância externa.

Número de espiras	Frequência de atenuação medida (MHz)	Capacitância necessária (CI + capacitor externo) (pF)
8	15,8	67,5
7	16,1	70,1
6	16,8	76,3
5	18,5	92,5
4	20,3	111,4
3	23,1	144,3
2	28,4	218
1	37,7	384,2

Fonte: Elaboração própria

Como podemos notar as antenas tiveram atenuações em frequências cada vez maiores e mais deslocadas da frequência desejada de 13,56 MHz com a diminuição do número de voltas, isso ocorre pela mudança na indutância das antenas.

Todas as antenas foram testadas sobre o detector RFID, conectadas apenas com o CI, sem capacitores externos, as antenas de 8, 7 e 6 espiras apresentaram leituras corretas do código associado ao CI, as demais antenas não apresentaram leitura. Após a correção das capacitâncias, com a adição de novos capacitores em paralelo, as antenas foram novamente testadas na ponte de reflexão, os resultados dessas medidas estão expostos na figura 22, e as características das antenas seguem na tabela 4.

Figura 22 - Atenuação das antenas após correção da capacitância adicionada.

Fonte: Elaboração própria

Tabela 4 - Características das antenas do ensaio de capacitância externa após correção.

Número de espiras	Frequência de atenuação medida (MHz)	Capacitância total (CI + capacitor externo) (pF)
8	13,9	67,1
7	14,2	70,0
6	14,4	76,7
5	14,7	93,0
4	14,9	113,0
3	14,5	172,0
2	12,7	450,0
1	14,5	1221,5

Fonte: Elaboração própria

Após a realização desse processo de tuning as frequências de atenuação ficaram satisfatoriamente próximas a frequência desejada de 13,56 MHz, as antenas então foram testadas sobre o detector RFID e as antenas de 8, 7, 6, 5, 4, 3 e 2 espiras tiveram leituras de código correta, mostrando-se viáveis, a antena de uma espira continuou não apresentando leitura.

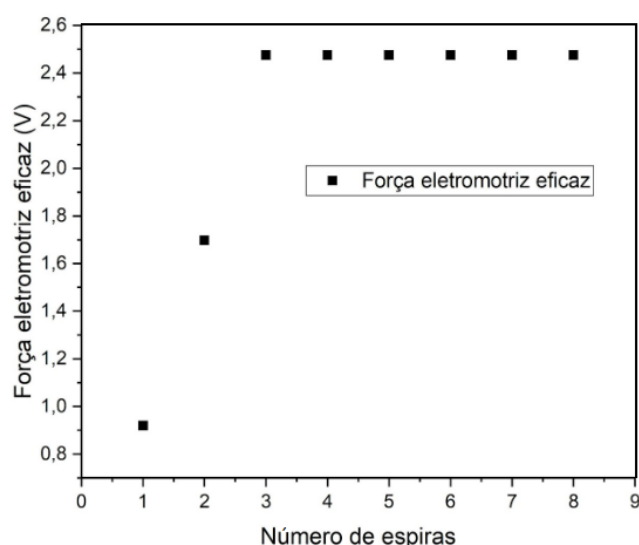
A partir desse ensaio, ficou estabelecido que a capacitância externa máxima funcional para esse arranjo seria de 400 pF. Para acessar o intervalo entre a última

antena funcional com 450 pF e a não funcional de 1221,5 pF, foram projetadas antenas com a necessidade de adição de capacitores progressivamente maiores, 450 pF, 500 pF, 550 pF, 600 pF, 750 pF, 800 pF, 850 pF, 900 pF, 950 pF. A primeira antena que foi construída, que teve um arranjo de capacitores de 450 pF adicionado, já não apresentou leituras no detector RFID.

4.1.3 Ensaio de força eletromotriz gerada nas antenas:

Para entender como o número de espiras interfere na força eletromotriz induzida nas antenas, foi elaborado e realizado o ensaio de força eletromotriz, cujo arranjo está descrito na seção de materiais e métodos. Como o osciloscópio não está preparado para caracterizar sinais da frequência que utilizamos (13,56 MHz) o único dado viável disponibilizado pelo equipamento é a força eletromotriz, que foi calculada considerando as distâncias entre o máximo e mínimo do corpo do sinal, a partir desse dado é possível calcular a tensão eficaz induzida na antena. Os resultados obtidos neste ensaio podem ser visualizados no gráfico da figura 23, que apresenta a força eletromotriz eficaz calculada para cada design de antena testado:

Figura 23 - Resultados do ensaio de força eletromotriz.



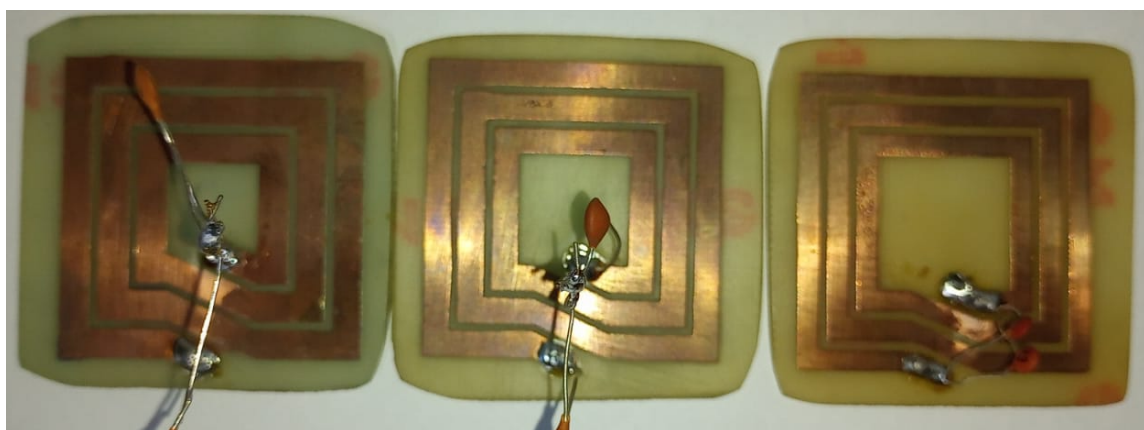
Fonte: Elaboração própria

Podemos observar na figura 23 que a tensão eficaz induzida é muito baixa para a antena de uma espira, se eleva para a antena de duas espiras e tem mais um salto para a antena de três espiras, e que a partir desse ponto temos um resultado relativamente estável em 2,475 V mesmo com a progressão no número de espiras.

4.1.4 Antenas de três espiras e menor razão de aspecto.

Em posse das informações obtidas com os ensaios anteriores, três designs foram projetados no software de design da Nuvoton para atingirem a frequência de ressonância desejada com a adição de capacitores de 274 pF, 307 pF e 346 pF. Na figura 24 podemos observar esses designs construídos em cobre.

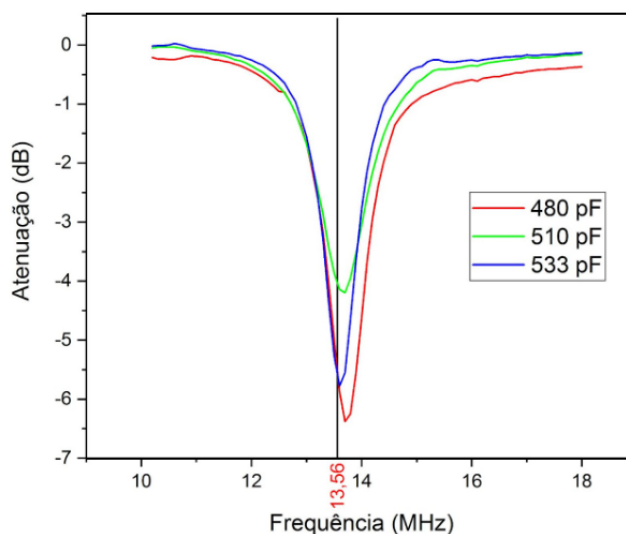
Figura 24 - Antenas de menor razão de aspecto construídas em cobre.



Fonte: Elaboração própria

O processo de tuning foi realizado para essas antenas e revelou que a capacitância necessária para que a frequência de atenuação fosse de 13,56 MHz foi muito diferente da planejada, atingindo valores de 480 pF, 510 pF e 533 pF, valores esses que se encontram fora da faixa de capacitância funcional para a operação das tags. Apenas a antena com capacitância externa de 480 pF apresentou leitura no sistema de detecção RFID, quando conectada ao CI, porém as leituras não se mostraram consistentes, esses formatos se demonstraram, portanto, inviáveis. Na figura 25 seguem as curvas de atenuação dessas antenas após a realização do processo de tuning das mesmas.

Figura 25 - Medidas de atenuação das antenas de menor razão de aspecto construídas em cobre.



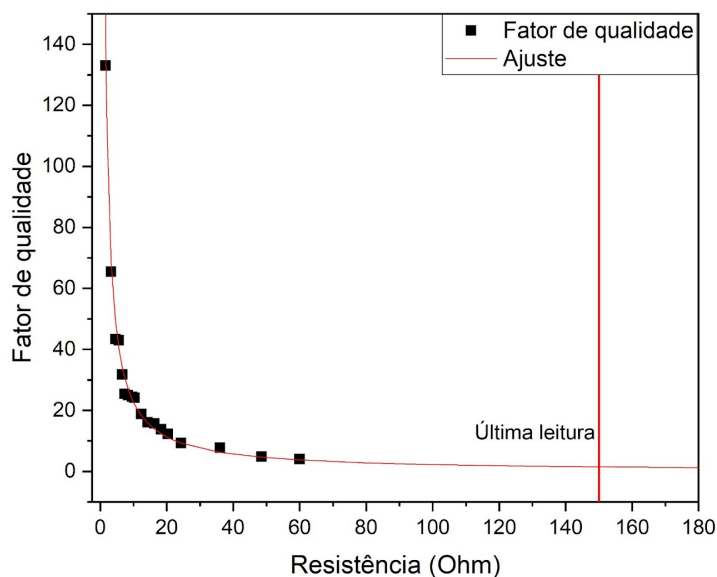
Fonte: Elaboração própria

No gráfico da figura 25 podemos observar que as curvas de atenuação das três antenas possuem alta intensidade de atenuação para a frequência desejada de 13,56 MHz, porém as altas capacitâncias impediram a leitura RFID, esse resultado reforça os achados do teste de capacitância máxima e demonstra que o software de design possui limitações para formas de antenas radicalmente diferentes das usuais.

4.1.5 Fator de qualidade em função da resistência.

Nesse ensaio antenas com indutância de 2,75 μ H fabricadas em cobre foram testadas para a variação de seu fator de qualidade com a variação de sua resistência total. Para que esse processo fosse possível, foram acoplados resistores progressivamente maiores em série as trilhas da antenas, e então o conjunto acoplado tem sua resistência e perfil de atenuação medido. Os resultados são representados na figura 26.

Figura 26 - Fator de qualidade em função da resistência.



Fonte: Elaboração própria

Na figura 26 a reta vermelha representa a resistência máxima acoplada em que ainda foi possível realizar leituras no detector RFID, seu valor foi de 150 Ω . É importante salientar que a distância de leitura é muito prejudicada com essa resistência adicionada, sendo necessário encostar a antena no leitor para ser possível realizar leituras nesse arranjo. O comportamento de leitura é totalmente satisfatório com resistências menores de 120 Ω .

Os cálculos de fator de qualidade só são possíveis para uma faixa de resistências, pois no caso de baixa resistência e alto fator de qualidade, os dados coletados na ponte de perda de retorno são insuficientes, devido a grandes saltos de atenuação entre as frações de frequência medidas, e nos casos de alta resistência com baixo fator de qualidade o que ocorre é que o ruído da medida passa a deixá-la inconsistente, pois este torna-se muito grande em relação à baixa atenuação de pico das antenas com estas resistências.

Como podemos observar na figura 26 o fator de qualidade realmente assumiu valores inversamente proporcionais aos da resistência dos conjuntos, dessa forma torna-se possível extrapolar os valores de fator de qualidade para resistências maiores e menores da faixa de medição. A extrapolação dos valores dos fatores de qualidade foi realizada utilizando a seguinte função:

$$Q = \frac{226}{R} \quad (5)$$

Sendo Q o fator de qualidade e R a resistência, essa função permite determinar o fator de qualidade mínimo necessário para o funcionamento dos dispositivos, que para resistência de $150 \, \Omega$ é de 1,5 e para a resistência de $120 \, \Omega$ é de 1,9.

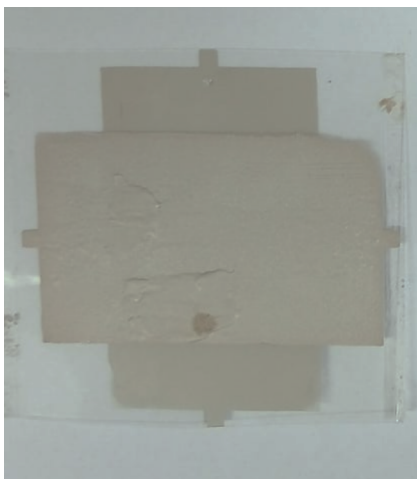
4.2 Ensaio utilizando PTF:

Nesta seção são descritos os resultados obtidos a partir dos testes utilizando a pasta condutora polimérica prata da empresa parceira TICON.

4.2.1 Capacitores com PTF:

Como um dos objetivos do trabalho é acessar a possibilidade de construção de TAGs totalmente impressas, torna-se interessante saber a relação entre capacitância e área impressa em diferentes substratos de forma a acessar a espessura e tipo de substrato mais viáveis para a impressão de capacitores. O procedimento de determinação da capacitância específica dos substratos consistiu na impressão de retângulos de PTF em lados opostos dos substratos e em medida da capacitância utilizando um espectrômetro de impedância. A medida de espessura dos substratos foi realizada utilizando um micrômetro, uma fotografia de um capacitor produzido neste ensaio está exposta na figura 27 e os resultados de capacitância específica estão expostos na tabela 5.

Figura 27 - Fotografia de um capacitor impresso produzido com PTF.



Fonte: Elaboração própria

Tabela 5 - Capacitâncias específicas dos substratos estudados.

Composição do substrato	Espessura (mm)	Capacitância específica (pF/cm ²)
PP	0,03	66,0
PP	0,02	96,0
PET	0,22	22,0
PET	0,21	24,0
PET	0,176	16,5
PET	0,02	92,1
Celofane	0,02	160,0

Fonte: Elaboração própria

A capacitância depende da espessura e da constante dielétrica do substrato (COLOCAR EQUAÇÃO), as relações observadas nesse ensaio revelam que os substratos poliméricos possuem constantes dielétricas semelhantes e a variação da espessura é o principal elemento na variação da capacitância por área impressa. O substrato de celofane apresenta constante dielétrica duas vezes maior que a dos substratos poliméricos, de forma que as áreas impressas nesse substrato podem ter metade do tamanho. Considerando que os capacitores que serão utilizados nas antenas possuem ordem de grandeza de capacitância na escala de dezenas a centenas de picofarads, substratos poliméricos com 0,02 mm de espessura parecem

ideais para economizar tinta sem que os capacitores impressos se tornem demasiadamente pequenos de forma a serem imprecisos.

4.2.2 Ensaio conexão dupla face PTF:

A estrutura das antenas planas depende da possibilidade de haver cruzamento da trilha condutora, já que para que esta possa se conectar ao CI vindo dos dois extremos do indutor que forma a antena, num indutor com mais de uma espira, o único caminho possível é atravessando a trilha. Como o cruzamento não pode se dar no mesmo plano há a necessidade de atravessar o substrato. Para acessar a viabilidade de construir uma trilha condutora através de um substrato polimérico, foi realizado um ensaio que consistiu em furar os substratos com furos de 2 mm de diâmetro e realizar a impressão das trilhas em ambos os lados dos substratos de PP, PET e Celofane, na figura 28 podemos observar o aspecto dos caminhos condutores que se formaram nesse processo.

Figura 28 - Fotografia do ensaio de conexão dupla face.



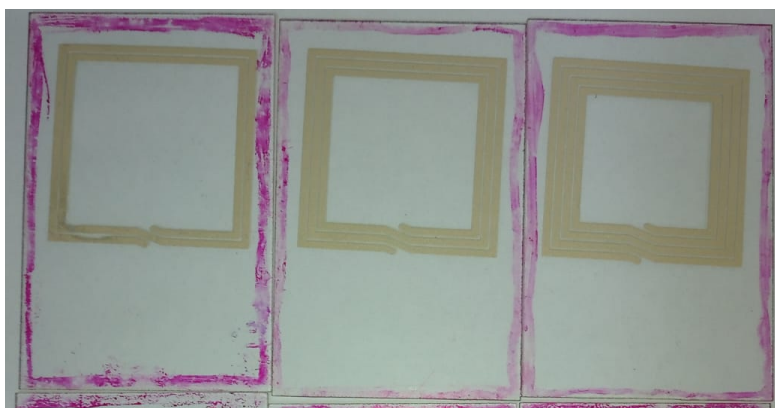
Fonte: Elaboração própria

Todas as amostras de todos os substratos apresentaram condução elétrica entre as superfícies, com resistência elétrica medida variando entre $0,6 \, \Omega$ a $1,5 \, \Omega$, ou seja, o método é satisfatório.

4.2.3 Antenas impressas em PTF:

Em posse dos resultados obtidos com as antenas de cobre, uma tela com designs de antenas para serem impressas em prata foi elaborada, os designs escolhidos foram as antenas de quatro, três e duas espiras do teste de capacitância máxima, as antenas impressas com esses designs estão expostas na figura 29.

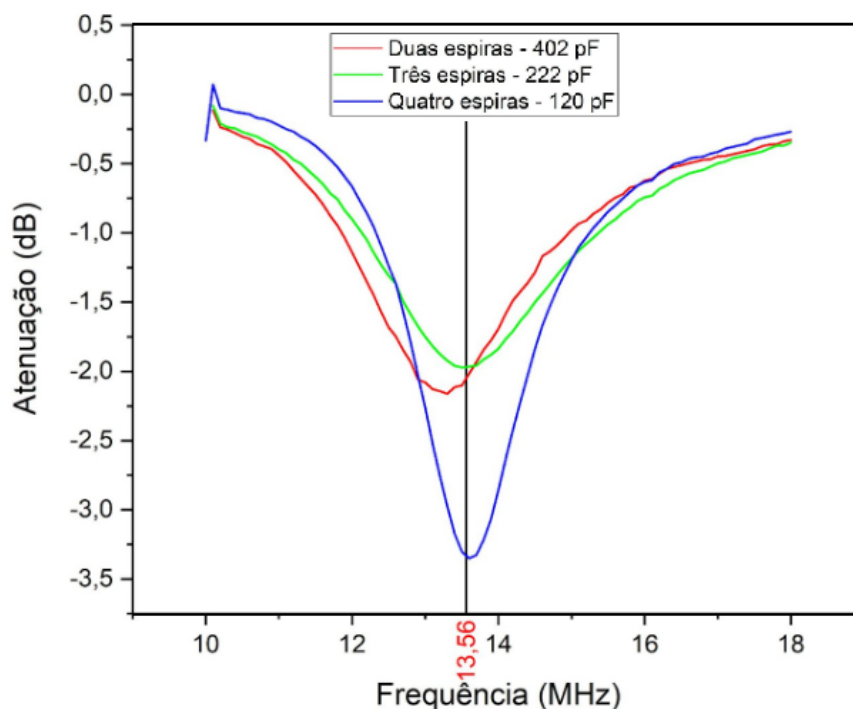
Figura 29 - Antenas impressas em prata.



Fonte: Elaboração própria

As antenas, cujas capacitâncias externas já eram conhecidas, tiveram capacitores acoplados com os valores iguais aos de seus análogos fabricados em cobre, e então tiveram suas medidas de atenuação realizadas para verificar a validade do processo de tuning. Pequenos ajustes de capacitância foram necessários para realizar o ajuste de frequência, na figura 30 podemos observar os resultados obtidos na ponte de perda de retorno.

Figura 30 - Medidas de atenuação das antenas de PTF de duas, três e quatro espiras.



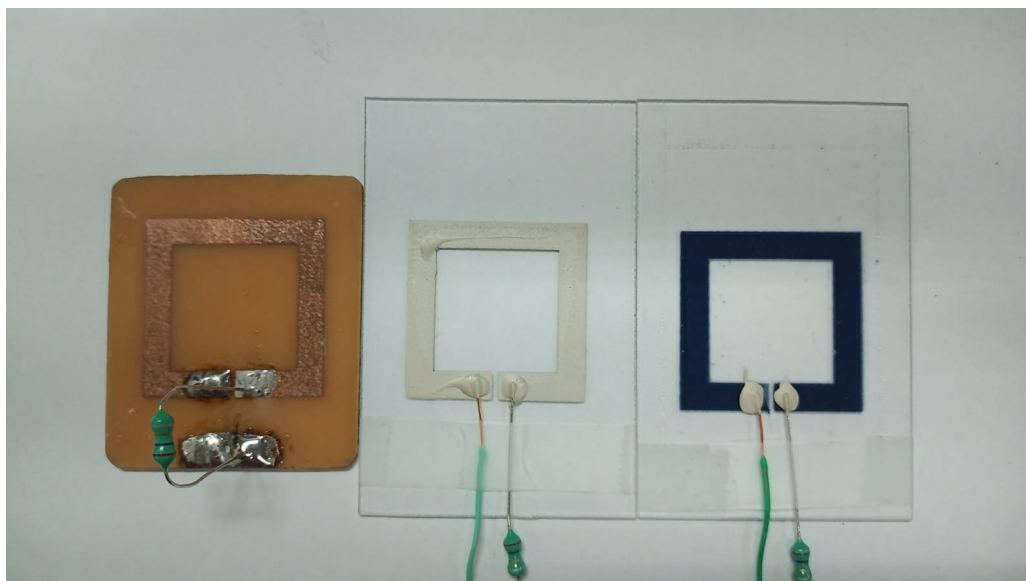
Fonte: Elaboração própria

Podemos observar que todas as antenas atingiram alta atenuação para a frequência de 13,56 MHz, no entanto quando essas foram acopladas ao CI e testadas sobre o leitor RFID nenhuma permitiu medidas do código RFID, suas resistências totais foram medidas e tem valores de $5,0\ \Omega$ para antena de duas espiras e $9,3\ \Omega$ para a antena de 3 espiras e $10,2\ \Omega$ para a antena de 4 espiras. Os fatores de qualidade dessas antenas são inferiores aos atingidos pelas antenas análogas construídas em cobre, isso pode ser um fator que levou ao não funcionamento das antenas, porém o ensaio de resistência máxima e fator de qualidade indicaria que a faixa de resistência atingida por estas antenas, estaria dentro de uma faixa aceitável, o que pode indicar que as antenas impressas têm uma queda de performance por outros motivos além do aumento da resistência.

4.2.4 Antenas impressas em PTF com indutor acoplado:

Dado ao fracasso das estratégias até então utilizadas, um novo conceito de antena foi testado, ele consiste em uma espira de baixa razão de aspecto acoplada a um micro indutor de $2,7\ \mu\text{H}$, que juntamente com a capacitância do próprio CI atinge frequências de atenuação na faixa desejada.

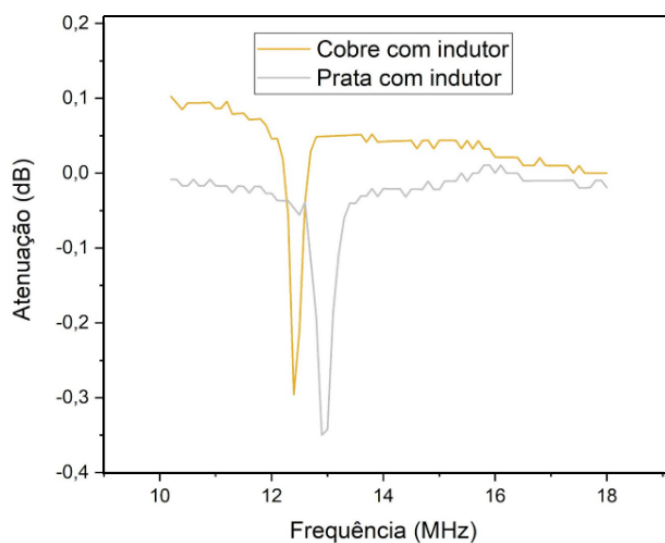
Figura 31 - Antenas de baixa razão de aspecto utilizando a nova estratégia de sintonização.



Fonte: Elaboração própria

Na figura 31 podemos observar antenas utilizando o conceito de indutor acoplado, construídas em cobre PTF e PCT, as antenas foram acopladas ao CI e testadas sobre o detector RFID e tanto a antena de cobre quanto a impressa em PTF tiveram leitura satisfatória, a antena feita com PCT não apresentou leitura. Em posse desse resultado favorável, foi realizada a medida de atenuação para as versões de cobre e PTF dessas antenas e os resultados estão na figura 32.

Figura 32 - Medidas de atenuação das antenas utilizando a nova estratégia de sintonização fabricadas em cobre e PTF.



Fonte: Elaboração própria

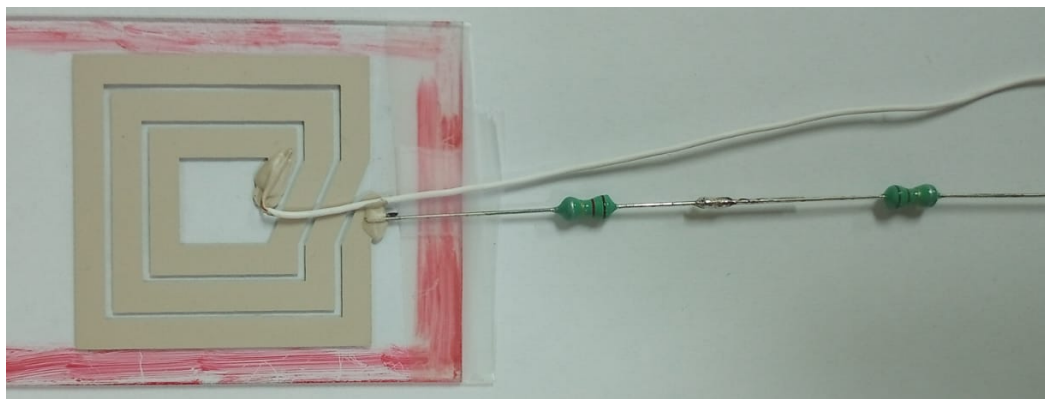
Podemos observar que o perfil de atenuação dessas antenas tem um pequeno deslocamento da frequência desejada de 13,56 MHz, o que pode ser explicado pelo fato do indutor possuir um erro máximo de 20% de valor de indutância, o que fará com que haja flutuações na frequência de ressonância para cada antenna construída. Observando a figura 32 é possível perceber que os perfis de atenuação são muito diferentes dos que encontramos até então, eles possuem baixa atenuação total e baixa dispersão de frequências, o que garante um alto fator de qualidade mesmo com baixa resposta. O resultado encontrado neste ensaio é extremamente favorável para o que é pretendido neste trabalho, já que esse conceito permite construir antenas de baixíssima razão de aspecto, sem as limitações anteriormente impostas pelo fato da capacitância externa adicionada apresentar um valor máximo.

Embora a leitura do código do CI utilizando as antenas de prata tenha sido possível, a distância de leitura se mostrou muito baixa, sendo necessário que as antenas estivessem encostadas ao leitor para que uma leitura satisfatória fosse realizada, esse fenômeno pode ser explicado pelo fato da força eletromotriz gerada nas antenas ser muito baixa (apresentado na seção 4.2.6).

4.2.5 Antena de três espiras e baixa razão de aspecto:

Na expectativa de aumentar a distância de leitura através do aumento da força eletromotriz induzida em uma antena de PTF, um novo design de três espiras com baixa razão de aspecto e indutores acoplados somando 2,4 μH foi construído, a antena pode ser visualizada na figura 33.

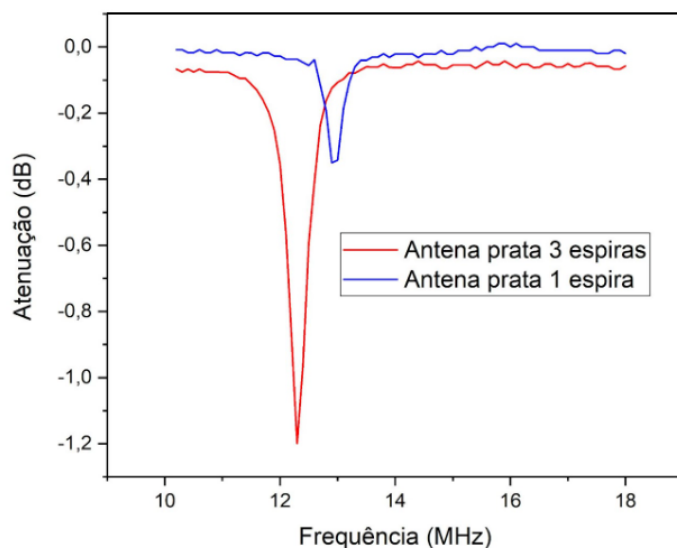
Figura 33 - Antena de PTF de três espiras.



Fonte: Elaboração própria

Conforme o esperado a nova antenna de três espiras realmente permitiu leituras a distâncias maiores, permitindo uma operação usual da tag. Na figura 34 podemos observar o comparativo de atenuação entre as antenas de uma e três espiras.

Figura 34 - Comparativo de atenuação entre as antenas de uma e três espiras



Fonte: Elaboração própria

Podemos observar na figura 34 que a atenuação na antena de três espiras foi muito mais intensa, o que em geral significa que houve aumento significativo da força eletromotriz gerada, esse aumento é provavelmente o responsável pela melhoria da distância de leitura.

4.2.6 Ensaios de força eletromotriz em antenas de tinta prata:

Para caracterizar as antenas impressas com pasta condutora à base de prata é essencial medir a força eletromotriz induzida nessas antenas, dessa forma o mesmo ensaio de força eletromotriz realizado nas antenas construídas em cobre foi realizado para as antenas de pasta prata. As medidas foram realizadas nas antenas com construção de alta razão de aspecto e capacitores acoplados de duas, três e quatro espiras, e também nas antenas com indutor acoplado.

Tabela 6 - Medidas de força eletromotriz em antenas impressas em PTF

Antena analisada	Força eletromotriz eficaz calculada (V)
2 espiras + 402 pF	1,41
3 espiras + 222 pF	2,12
4 espiras + 120 pF	2,12
1 espira + 2,7 uH	0,71
3 espiras + 2,4 uH	1,41

Fonte: Elaboração própria

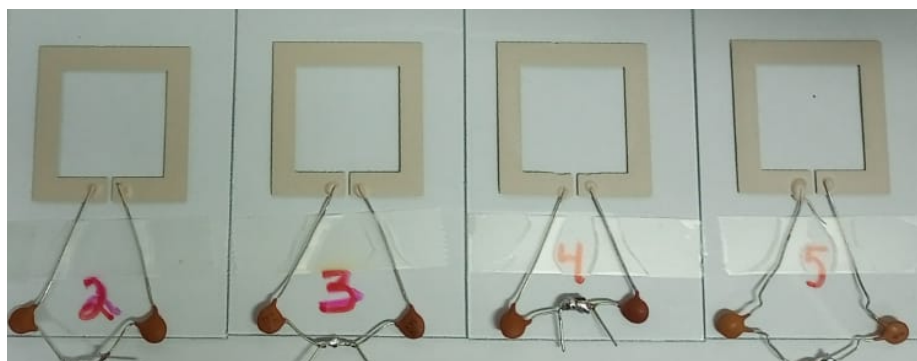
4.3 Ensaios com núcleos impressos de alta permeabilidade magnética:

Os ensaios realizados com a pasta condutora prata demonstraram que as antenas impressas tornam-se funcionais com baixa razão de aspecto, porém para conseguirmos atingir a indutância total necessária na tag para que ocorra a ressonância na faixa desejada, de 13,56 MHz, foi utilizada a estratégia de acoplamento da antena com um indutor comercial. Embora esse método tenha sido bem sucedido, antenas completamente impressas seriam uma alternativa mais viável do ponto de vista da produção. Dessa forma, considerando que a indutância de um indutor é diretamente proporcional a permissividade magnética de seu núcleo, nessa seção do trabalho seguem os resultados de alteração de indutância de indutores através da impressão de tintas com alta permeabilidade magnética em seus núcleos.

4.3.1 Tinta à base de pó de ferro:

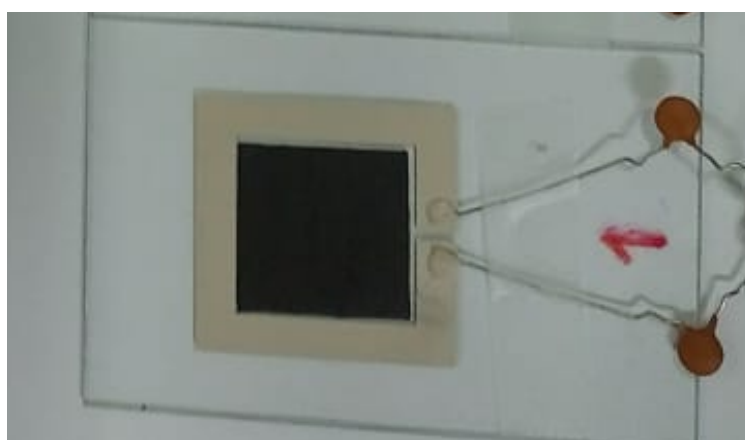
A formulação utilizada para a produção de núcleos de alta permeabilidade magnética consistia em 70% em massa de pó de ferro acrescidos de 30% de massa do veículo utilizado na fabricação da PTF. Como indutor, foram utilizadas antenas impressas em PTF na forma quadrada de uma espira com 35x35 mm. Essas antenas então tiveram um conjunto de capacitores adicionados com capacitância total de 500 pF e sua atenuação foi medida antes e depois da impressão de um núcleo e tiveram o resultado exposto na figura 37:

Figura 35 - Antenas impressas antes da deposição do núcleo de ferro.



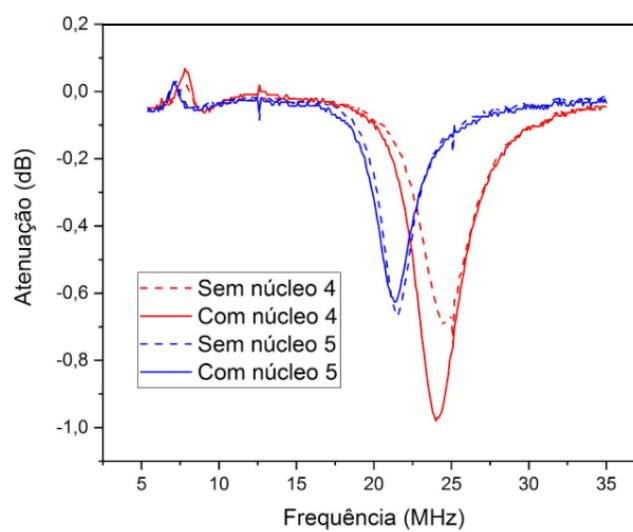
Fonte: Elaboração própria

Figura 36 - Antena impressa com o núcleo impresso.



Fonte: Elaboração própria

Figura 37 - Atenuação das antenas antes e depois da impressão do núcleo à base de pó de ferro.



Fonte: Elaboração própria

No gráfico da figura 37 as linhas vermelhas são relativas a amostra 4 e as azuis relativas a amostra 5, as linhas tracejadas representam a atenuação medida antes da deposição dos núcleos, e as linhas contínuas a atenuação após a deposição dos núcleos. A diferença nos valores de atenuação foi muito discreta, o que revela que a mudança na indutância foi muito pequena, como podemos observar na tabela 7.

Tabela 7 - Variação das indutâncias após a deposição dos núcleos.

Amostra	Frequência de ressonância (MHz)	Indutância calculada (μH)
4 sem núcleo	24,5	0,08439915339
4 com núcleo	24,2	0,08650466468
5 sem núcleo	21,5	0,1095956556
5 com núcleo	21,4	0,1106223072

Fonte: Elaboração própria

A mudança na indutância calculada foi de 2,5 % para a amostra 4 e 0,9% para a amostra 5, considerando que a indutância para que a frequência de ressonância atinja 13,56 MHz, com uma capacitância do CI de 50 pF, é 2,755 μH seria necessário um aumento de 2750% em relação a indutância inicial.

4.4 Ensaios utilizando pasta condutora transparente:

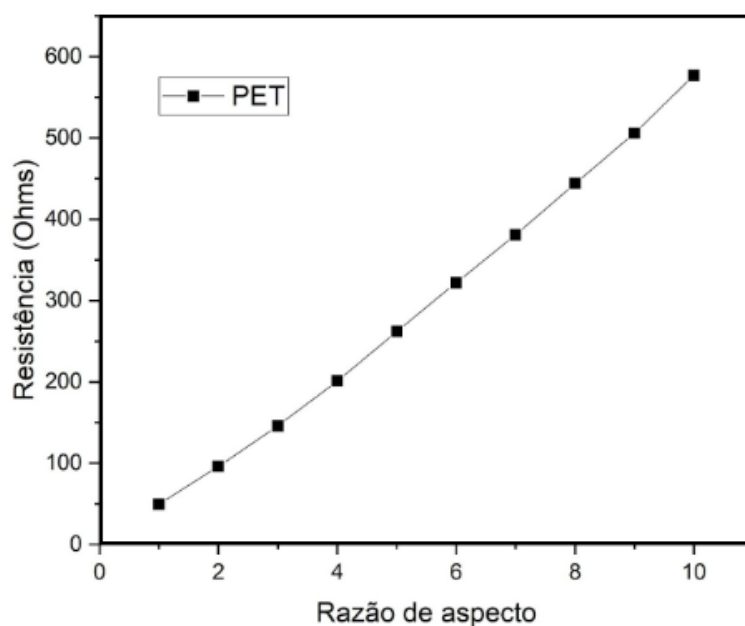
Nessa seção são apresentados todos os resultados obtidos utilizando a Pasta condutora transparente (PATENTE BR 10 2019 026350 - 4) e formulações semelhantes em ensaios para a adequação da mesma para a fabricação de antenas RFID - HF e em um exemplo de antena produzido com esta pasta.

4.4.1 Ensaios de deposição de PCT sobre diferentes substratos:

Para descobrir a viabilidade de impressão de PCT em sua formulação padrão em diferentes substratos, foram realizados ensaios de adesão e condutividade utilizando celofane, polipropileno (PP) e PET, as medidas de resistência de folha

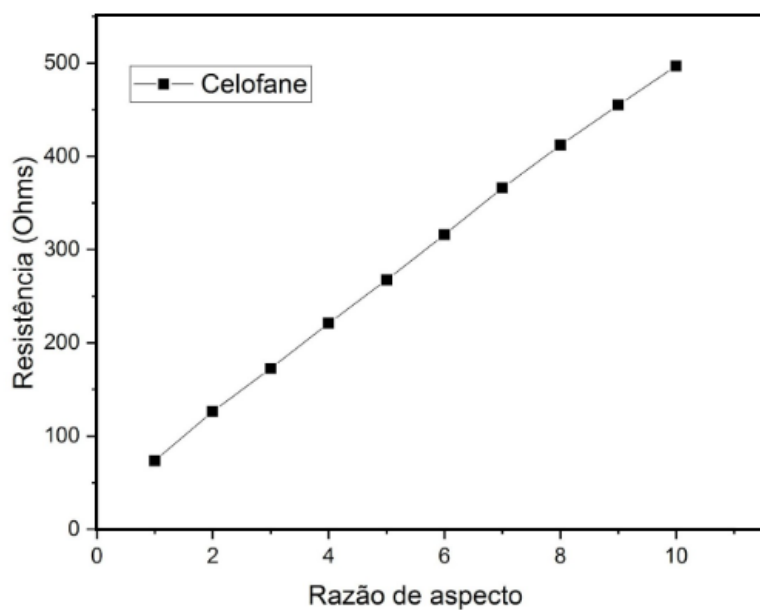
para PET e celofane são apresentadas nas figuras 38 e 39 respectivamente, e os resultados de adesão são apresentados na tabela 8.

Figura 38 - Resistência em função da razão de aspecto de filmes de PCT depositados sobre PET.



Fonte: Elaboração própria

Figura 39 - Resistência em função da razão de aspecto de filmes de PCT depositados sobre celofane.



Fonte: Elaboração própria

Tabela 8 - Resultados de adesão de PCT em diferentes substratos.

Substrato	Resultados dos testes de adesão
PET	2 resultados GR1 e 4 resultados GR0
Celofane	6 resultados GR4
Polipropileno	6 resultados GR4

Fonte: Elaboração própria

O substrato de PP não apresentou condutividade nem adesão, não houve transferência de PCT de forma satisfatória para esse substrato, pouca tinta foi transferida e houve formação de ilhas, o que pode ser explicado por uma maior força de coesão da PCT em relação a força de aderência da mesma com o substrato. Embora os resultados de condutividade com o celofane tenham sido ótimos indicando uma boa transferência na impressão, após a secagem a adesão nesse substrato foi praticamente nula, o substrato de PET apresentou boa adesão e boa transferência, se mostrando como a alternativa viável.

4.4.2 Ensaio conexão dupla face PCT:

De forma análoga ao procedimento realizado com a PTF também era necessário acessar a possibilidade de atravessar o substrato com a PCT, porém dado a natureza menos viscosa (o que gera filmes mais finos, nas paredes dos furos) e condutora da PCT, foram realizados testes com 1, 2 e 3 furos de 2 mm em substrato de PET para obter as resistências da conexão dupla face, abaixo os resultados:

Tabela 9 - Resultados conexão dupla face com PCT

Número de furos	Resistência média da conexão (Ω)
1 furo	139
2 furos	30
3 furos	32

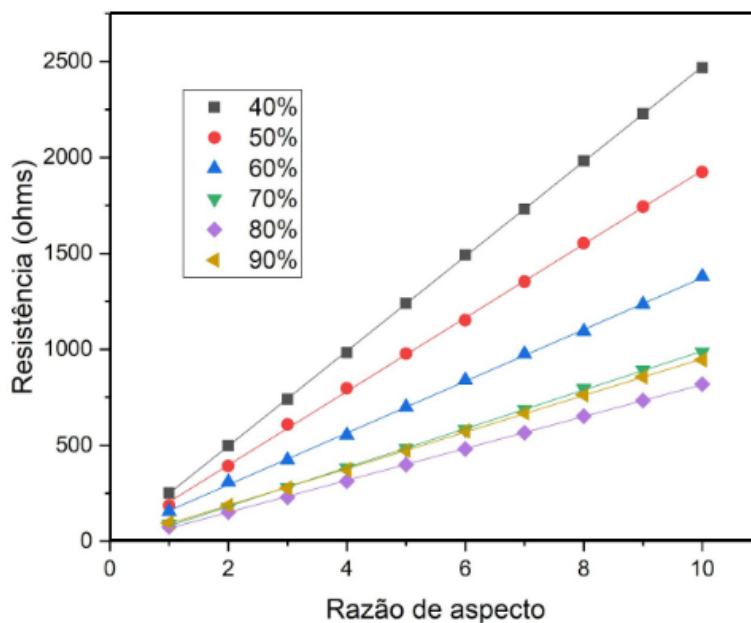
Fonte: Elaboração própria

O procedimento mostra a necessidade de pelo menos dois furos para minimizar a resistência de conexão dupla face no caso da PCT, não parece haver vantagem em furar o substrato mais do que duas vezes

4.4.3 Ensaio de resistência de folha e condutividade em função da concentração de condutor em formulações de PCT:

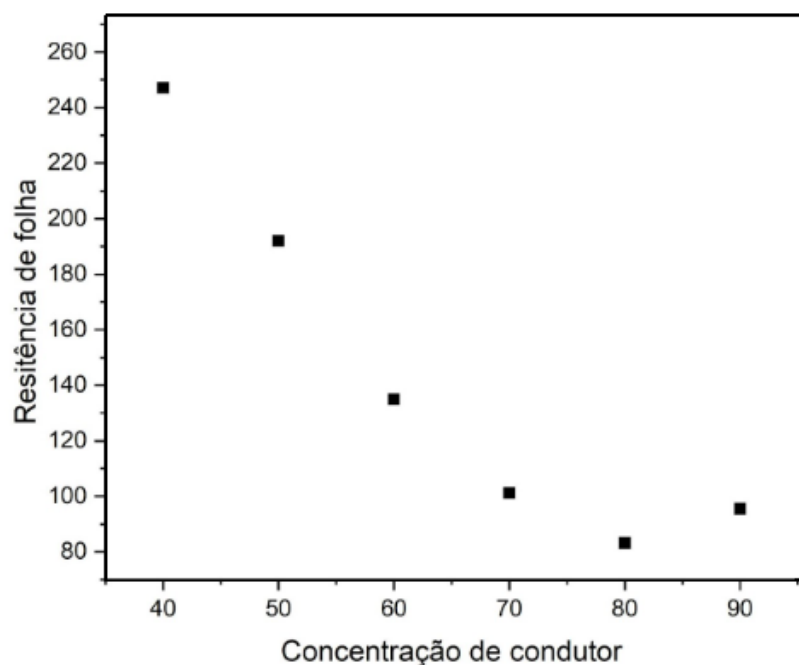
Para adequar a PCT aos parâmetros de condutividade elétrica acessados durante o ensaio de resistência máxima, foi elaborado um ensaio de concentração de condutor. Esse ensaio consiste na obtenção da resistência de folha de superfícies impressas em PET e em vidro de diferentes formulações da PCT e posteriormente na medida da espessura dessas superfícies impressas utilizando perfilometria, as figuras 40, 41 e 42 apresentam os resultados desse ensaio.

Figura 40 - Resistência em função da razão de aspecto para diferentes concentrações de condutor.



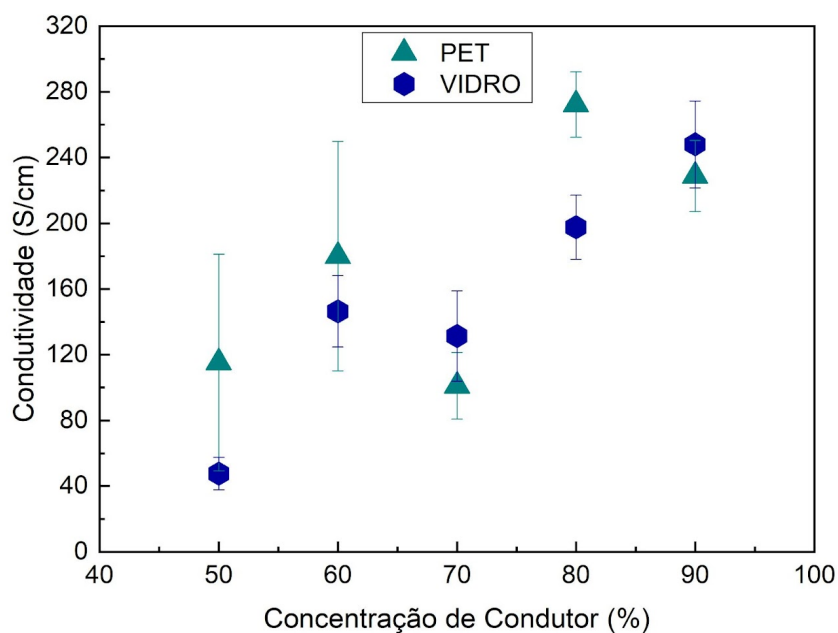
Fonte: Elaboração própria

Figura 41 - Resistência de folha em função da concentração de condutor.



Fonte: Elaboração própria

Figura 42 - Condutividade em função da concentração de condutor.



Fonte: Elaboração própria

O ensaio deixou claro que há um grande aumento na condutividade elétrica para formulações com mais de 60% de condutor. Um resultado desse tipo era esperado, já que esse aumento de condutividade ocorre quando atingimos a concentração de percolação, e aparentemente para a PCT isso ocorre com 60%

condutor. Nessa concentração os agentes condutores possuem densidade suficiente para formar caminhos ininterruptos dentro do material, permitindo uma conexão direta entre os eletrodos do ensaio.

A condutividade das amostras em PET teve um comportamento muito caótico, o que pode ser explicado pela impossibilidade de realização de medidas de perfilometria satisfatórias, já que esse substrato está sujeito a imperfeições, tanto na forma de ondulações como riscos em sua superfície. Felizmente o ensaio permitiu a visualização de que a percolação também acontece no PET, porém os dados de condutividade são mais viáveis nas amostras de vidro.

Dado o caráter linear que a condutividade atinge após a percolação, imaginamos que todas as formulações a partir desse ponto seriam viáveis. Porém como o controle de viscosidade é extremamente importante e a garantia de adesão também depende de alguma margem de concentração para aditivos, formulações de 60, 70 e 80% são mais viáveis.

4.4.4 Adesão por temperatura de secagem:

Durante os ensaios com a PCT observamos que a adesão para formulações idênticas parecia ser diferente quando as temperaturas de secagem eram diferentes. Dessa forma foi elaborado um ensaio de temperatura de secagem para avaliar como esse parâmetro interferia na adesão em PET, as amostras foram mantidas nas temperaturas enumeradas na tabela 10 por 24 horas:

Tabela 10 - Resultados de adesão por temperatura de secagem

50 °C	GR4
60 °C	GR4
70 °C	GR3
75 °C	GR0
80 °C	GR0
90 °C	GR0

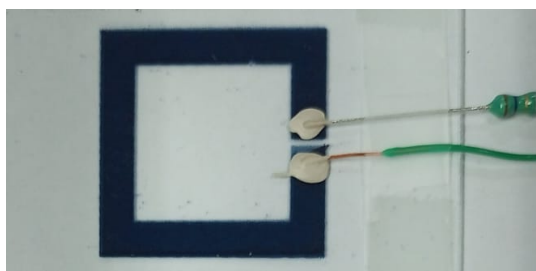
Fonte: Elaboração própria

Esse ensaio revelou que não ocorre adesão da PCT em PET para as temperaturas de secagem abaixo de 70 °C, na temperatura de 70 °C podemos notar adesão parcial, após a temperatura de 75 °C a adesão passa a ser completa, o que estabelece então que essa deve ser a temperatura de secagem mínima.

4.4.5 Antenas impressas com PCT:

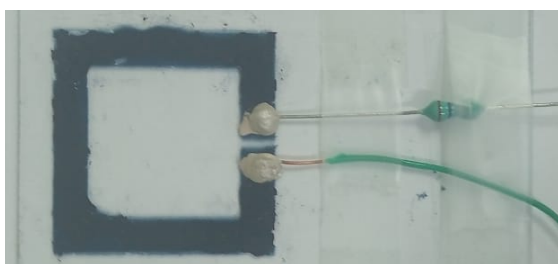
Após a impressão de dez camadas de PCT, utilizando o design de menor razão de aspecto (Uma espira com indutor acoplado de 2,7 μ H) foi possível produzir antenas com resistências na casa de 200 Ω , que estão representadas na figura 43 porém esse valor de resistência de antena ainda não foi suficiente para garantir o funcionamento das mesmas. A impressão de mais camadas parecia inviável, dessa forma para realizar uma prova de conceito, uma antena com esse design foi produzida utilizando um método alternativo, uma deposição manual de um filme grosso utilizando uma espátula e um decalque com o formato da antena de uma espira com indutor acoplado. A antena construída nesse processo está exposta na figura 44 e acabou possuindo resistência de 16,5 Ω , com essa antena foi possível realizar detecção RFID.

Figura 43 - Antenas de PCT com dez camadas.



Fonte: Elaboração própria

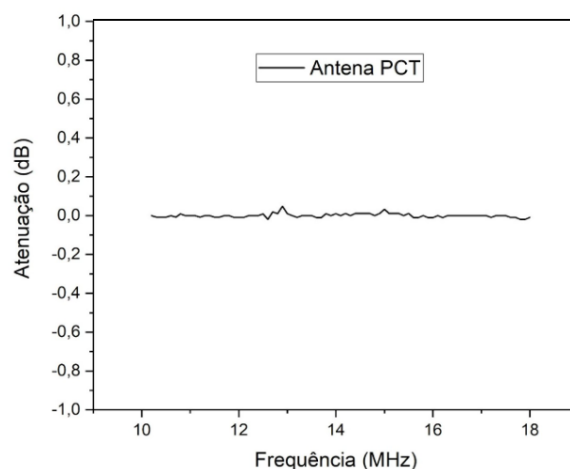
Figura 44 - Antena de PCT fabricada manualmente.



Fonte: Elaboração própria

O espectro de atenuação da antena representada na figura 44 foi medido na ponte de perda de retorno e os resultados são apresentados no gráfico da figura 45.

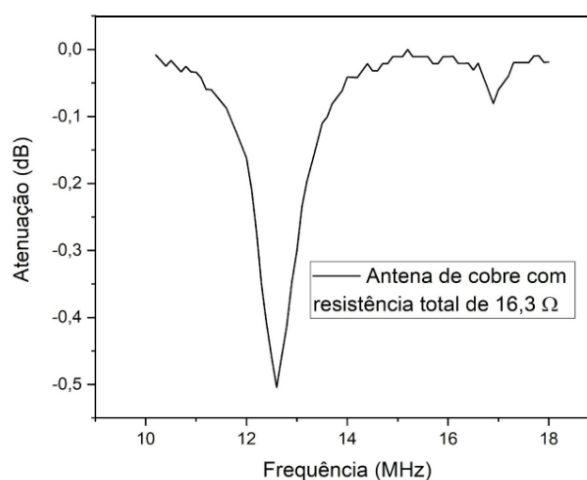
Figura 45 - Medida de atenuação da antena de PCT fabricada manualmente.



Fonte: Elaboração própria

A medida do espectro de atenuação apresentado na figura 45 trouxe um resultado surpreendente, não é possível ver uma curva de atenuação. Embora a resistência da antena fabricada em PCT seja relativamente alta ($16,5 \Omega$) para essa escala de resistência, normalmente ainda é possível observar uma curva considerável de atenuação, conforme é exemplificado na figura 46 com a curva de atenuação de uma antena de cobre de resistência semelhante.

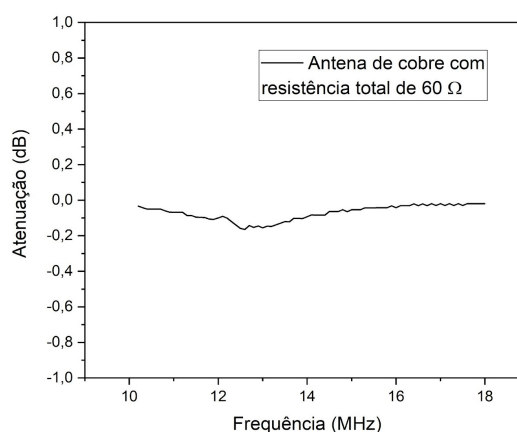
Figura 46 - Medida de atenuação de uma antena fabricada em cobre com resistência semelhante a antena de PCT



Fonte: Elaboração própria

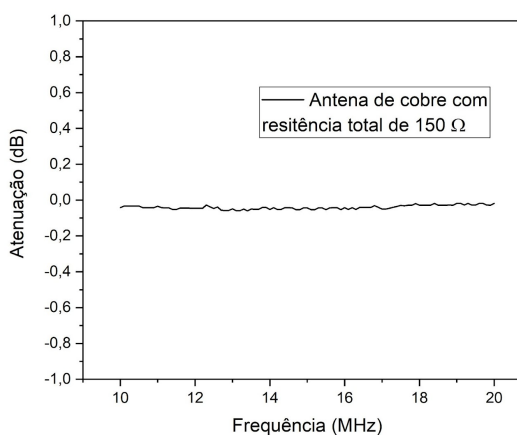
Como foi possível realizar medidas com essa antena no leitor RFID sabemos que sua frequência de atenuação precisa estar dentro da faixa de leitura da ponte de perda de retorno. Uma possibilidade de explicação para esse tipo de leitura seria de que a resistência da antena de PCT varia grandemente com a frequência, dessa forma foi realizada uma espectroscopia de impedância para descobrir a impedância dessa antena a 13,56 MHz, e o resultado foi de 49,5 Ω , o que pode explicar esse padrão de atenuação. Como medida de comparação, seguem na figura 47 e 48 os gráficos de atenuação de antenas de cobre com resistência total de 60 Ω e 150 Ω respectivamente. Essas antenas de alta resistência funcionaram para detecção RFID, mas não apresentam perfil de atenuação bem definido.

Figura 47 - Medida de atenuação de uma antena fabricada em cobre com resistência total de 60 Ω .



Fonte: Elaboração própria

Figura 48 - Medida de atenuação de uma antena fabricada em cobre com resistência total de 150 Ω .



Fonte: Elaboração própria

Para completar a caracterização dessa antena, ela também foi testada para força eletromotriz gerada quando colocada sobre o leitor RFID, a força eletromotriz eficaz calculada foi de 0,71 V.

4.5 Fator de qualidade das antenas:

Uma métrica muito importante para o funcionamento das antenas RFID é o seu fator de qualidade, tendo isso em vista o fator que qualidade de todas as antenas produzidas durante a execução do trabalho são apresentadas nessa sessão.

Tabela 11 - Fator de qualidade das antenas produzidas.

Antena analisada	Fator de qualidade
Ensaio de resistência máxima (antena de três espiras de cobre com resistência de 150 Ω)	1,50
Duas espiras convencional prata	4,84
Três espiras convencional prata	4,11
Quatro espiras convencional prata	7,53
NTAG 213	27,12
Duas espiras cobre	> 70
Três espiras cobre	> 70
Quatro espiras cobre	> 70
Cinco espiras cobre	> 70
Seis espiras cobre	> 70
Sete espiras cobre	> 70
Oito espiras cobre	> 70
Uma espira indutor acoplado prata	> 70
Três espiras indutor acoplado prata	> 70

Fonte: Elaboração própria

A natureza dos dados produzidos pela ponte de perda de retorno torna medidas de fator de qualidade maiores que 70 imprecisas, dessa forma os fatores de qualidade calculados acima deste valor são registrados apenas como > 70 .

A comparação dos fatores de qualidade revela algo que não era esperado, antenas impressas com fator de qualidade mais alto do que aquele definido pelo ensaio de resistência máxima não funcionaram. Aparentemente, antenas impressas precisam possuir fatores de qualidade mais altos do que antenas fabricadas em cobre.

5. CONCLUSÃO:

Neste estudo investigamos a influência das propriedades de antenas produzidas por impressão serigráfica no desempenho de identificadores RFID-HF. Foram investigadas as influências do número de espiras, da resistência elétrica, da indutância e da capacitância de sintonia na atenuação em 13,56 MHz, na força eletromotriz gerada, no fator de qualidade e na funcionalidade das antenas. Nossos estudos, demonstraram que a baixa condutividade elétrica dos materiais empregados para a produção de antenas impressas inviabiliza sua aplicação empregando as atuais metodologias de sintonização das antenas. A partir destes resultados, desenvolvemos uma nova estratégia de sintonização que permitiu a aplicação prática de antenas fabricadas com pasta prata e pasta condutora transparente fabricadas pela empresa TICON.

6. REFERÊNCIAS:

Allen, Mark L. *et al.* Applicability of Metallic Nanoparticle Inks in RFID Applications. IEEE TRANSACTIONS ON COMPONENTS AND PACKAGING TECHNOLOGIES. PISCATAWAY. 32 vol. 2. pag 325-332. JUN, 2009. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4801564>. Acesso em: 15/12/2022

Dziedzic, Andrzej; Slobodzian, Piotr. Modern Microelectronic Technologies in Fabrication of RFID Tags. RADIOENGINEERING. PRAHA. 20 vol. 1. pag 187-193. APR, 2011. Disponível em: https://www.radioeng.cz/fulltexts/2011/11_01_187_193.pdf. Acesso em: 16/12/2022

Fennani, B.; Hamam, H.; Dahmane, A. O. (2011). RFID overview. ICM 2011 Proceeding. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6177411>. Acesso em: 15/12/2022

Fernandez-Salmeron, Jose *et al.* HF RFID Tag as Humidity Sensor: Two Different Approaches. IEEE SENSORS JOURNAL. PISCATAWAY. 15 vol. 10. pag 5726-5733. OCT, 2015. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7132688>. Acesso em: 15/12/2022

Janeczek, Kamil *et al.* Printed HF antennas for RFID on-metal transponders. CIRCUIT WORLD. BINGLEY. 42 vol. 1. pag 2-8. , 2016. Disponível em: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/CW-10-2015-0046/full/html>. Acesso em: 07/12/2022

Le, Vy; Lemmer, Ulrich; Mackensen, Elke. Analysis of Miniaturized Printed Flexible RFID/NFC Antennas Using Different Carrier Substrates. IEEE JOURNAL OF RADIO FREQUENCY IDENTIFICATION. PISCATAWAY. 4 vol. 4. pag 428-437. DEC, 2020. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9113272>. Acesso em: 15/12/2022

Le, Vy *et al.* A Comparison of Printed Flexible RFID/NFC Antennas for a Microelectronic Measurement System. 2019 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON RFID TECHNOLOGY AND APPLICATIONS (IEEE RFID-TA 2019). NEW YORK, 2019. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8892040>. Acesso em: 10/12/2022

Li, Miao *et al.* All Printed Large Area E-field Antenna Utilizing Printed Organic Rectifying Diodes for RF Energy Harvesting. 2018 IEEE 18TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON NANOTECHNOLOGY (IEEE-NANO). NEW YORK, 2018. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8626318>. Acesso em: 15/12/2022

Li, Xiaotian *et al.* A Paper-Based Screen Printed HF RFID Reader Antenna System. IEEE JOURNAL OF RADIO FREQUENCY IDENTIFICATION. PISCATAWAY. 2 vol. 3. pag 118-126. SEP, 2018. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8458180>. Acesso em: 15/12/2022

Machiels, Jarne *et al.* Screen Printed Antennas on Fiber-Based Substrates for Sustainable HF RFID Assisted E-Fulfilment Smart Packaging. MATERIALS. BASEL. 14 vol. 19. OCT, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/14/19/5500>. Acesso em: 16/12/2022

Quintero, A. Vasquez *et al.* Smart RFID label with a printed multisensor platform for environmental monitoring. FLEXIBLE AND PRINTED ELECTRONICS. BRISTOL. 1 vol. 2. JUN 1, 2016. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2058-8585/1/2/025003>. Acesso em: 15/12/2022

Salmeron, Jose F *et al.* Physical and Electrical Properties of Ink-jet and Screen Printed Patterns for RFID HF Antennas. 2012 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON RFID-TECHNOLOGIES AND APPLICATIONS (RFID-TA). NEW YORK, 2012. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6404508>. Acesso em: 15/12/2022

Sun, Haixiang *et al.* Screen Printed HF RFID Antennas on Polyethylene Terephthalate Film. IEEE JOURNAL OF RADIO FREQUENCY IDENTIFICATION. vol. 3. no. 2. pag. 91-97, JUN, 2019. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8669867>. Acesso em: 15/12/2022

Tarapata, Grzegorz; Paczesny, Daniel; Kawecki, Krzysztof. Characterization of Inkjet-Printing HF and UHF antennas for RFID applications. PHOTONICS APPLICATIONS IN ASTRONOMY, COMMUNICATIONS, INDUSTRY, AND HIGH-ENERGY PHYSICS EXPERIMENTS 2013. BELLINGHAM. 8903, 2013. Disponível em: <https://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.2041792>. Acesso em: 07/12/2022

Xiao, Gaozhi *et al.* Improving the Q -Factor of Printed HF RFID Loop Antennas on Flexible Substrates by Condensing the Microstructures of Conductors. IEEE JOURNAL OF RADIO FREQUENCY IDENTIFICATION. PISCATAWAY. 2 vol. 2. pag 111-116. JUN, 2018. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8409267>. Acesso em: 10/12/2022

APÊNDICE A - Programa para detecção RFID:

```

#include <SPI.h>
#include <RFID.h>

#define SDA_DIO 9
#define RESET_DIO 8
RFID RC522(SDA_DIO, RESET_DIO);

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  SPI.begin();
  RC522.init();
}

void loop()
{
  if (RC522.isCard())
  {
    RC522.readCardSerial();
    Serial.println("Card detected:");
    for(int i=0;i<5;i++)
    {
      Serial.print(RC522.serNum[i],DEC);
      //Serial.print(RC522.serNum[i],HEX); //to print card detail in Hexa Decimal
format
    }
    Serial.println();
    Serial.println();
  }
  delay(50);
}

```