

## RESSALVA

Atendendo solicitação do autor,  
o texto completo desta dissertação  
será disponibilizado somente a partir  
de 27/06/2025.

# **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. Giovani 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 $\Omega$ .....      | 73 |
| Figura 48 - Medida de atenuação de uma antena fabricada em cobre com resistência total de 150 $\Omega$ .....     | 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<br>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 ABREVIações**

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

|                                                                                                                   |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO:</b>                                                                                             | <b>13</b> |
| <b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA:</b>                                                                                  | <b>19</b> |
| 2.1 Antenas RFID - HF impressas:                                                                                  | 19        |
| <b>3. MATERIAIS E MÉTODOS:</b>                                                                                    | <b>28</b> |
| 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        |
| <b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO:</b>                                                                                 | <b>46</b> |
| 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        |
| <b>5. CONCLUSÃO:.....</b>                             | <b>76</b> |
| <b>6. REFERÊNCIAS:.....</b>                           | <b>77</b> |
| <b>APÊNDICE A - Programa para detecção RFID:.....</b> | <b>79</b> |

## 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.

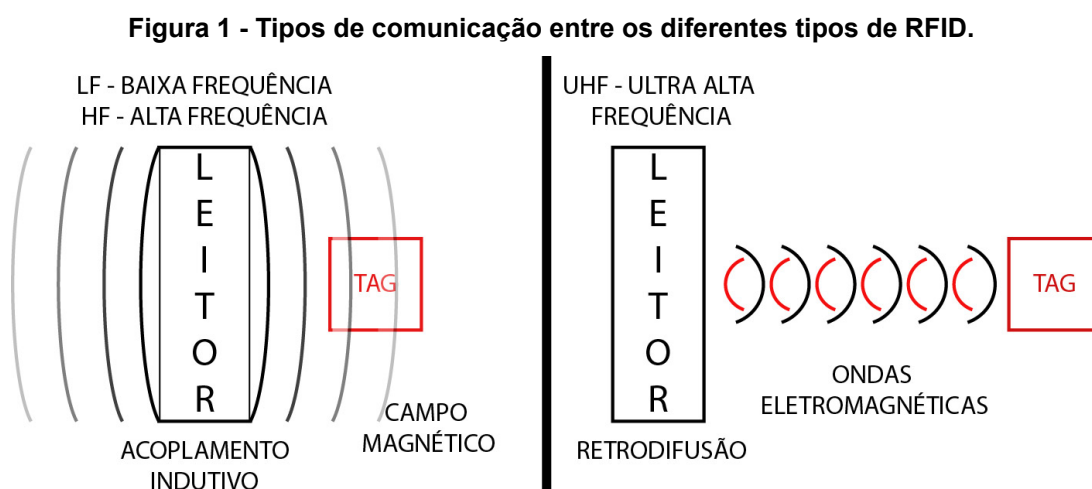
A tecnologia LF opera usualmente com as frequências portadoras de 125 KHz e 134,2 KHz e funciona por acoplamento indutivo, a grande vantagem desses sistemas é que essas frequências não são afetadas pela água e são menos afetadas por metais, o que torna essas tags ideais para identificadores em implantes 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.

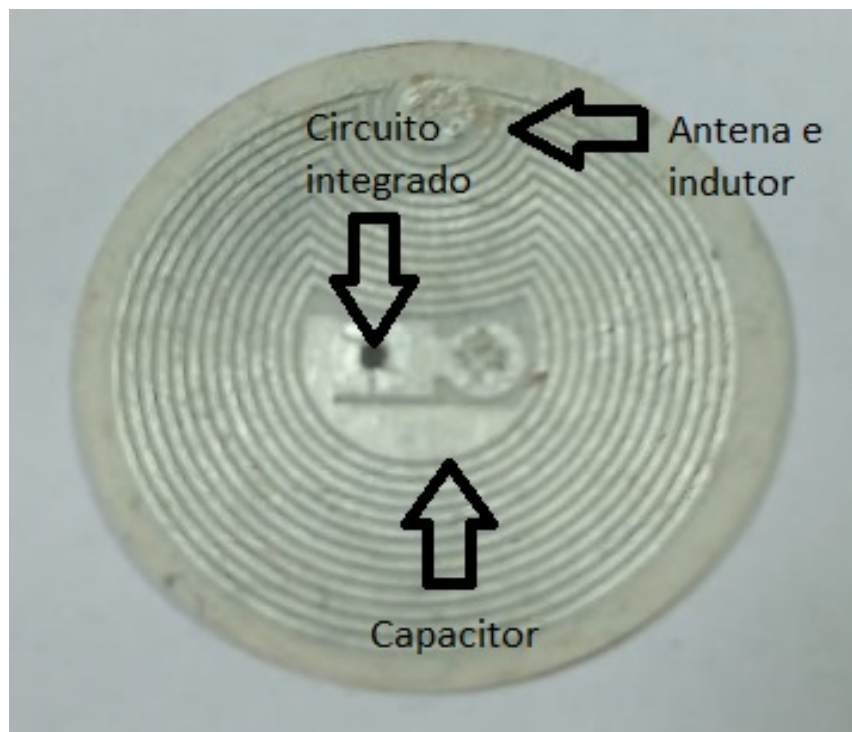


Fonte: Elaboração própria

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

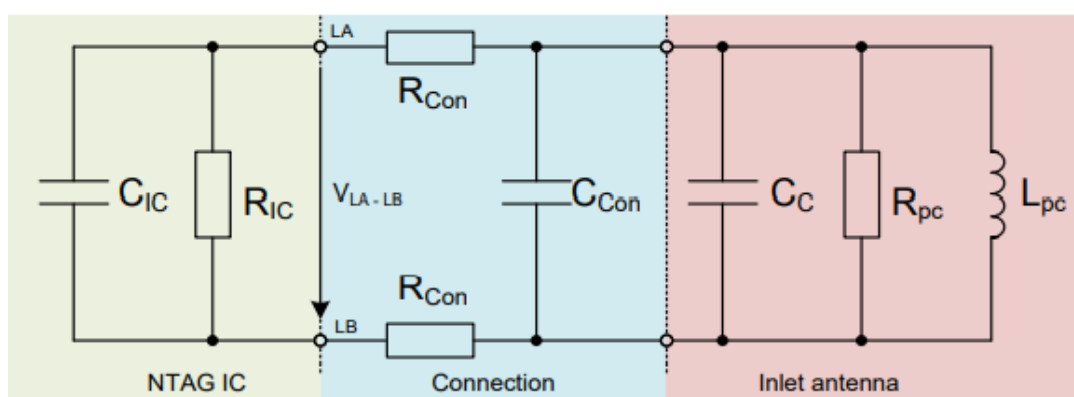
respectivamente, as tags possuem a forma usual conforme é possível observar na figura 2 e estrutura elétrica básica esquematizada na figura 3.

**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.

## **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](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