



## **Desenvolvimento de etiquetas planares passivas UHF RFID em superfícies metálicas e não metálicas com a proposta de uma figura de mérito para avaliação**

### **Development of passive planar UHF RFID tags on metallic and non-metallic surfaces with a proposed figure of merit for evaluation**

#### **Juliana Borges Ferreira**

Doutoranda em Engenharia Elétrica

Instituição: Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

Endereço: Farroupilha, Porto Alegre - RS, CEP: 90010-150

E-mail: ju.borges@ufrgs.br

#### **Álvaro Augusto Almeida de Salles**

Doutor em Engenharia Elétrica

Instituição: Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

Endereço: Farroupilha, Porto Alegre - RS, CEP: 90010-150

E-mail: aasalles@ufrgs.br

#### **Giovani Bulla**

Doutora em Engenharia Elétrica

Instituição: Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

Endereço: Farroupilha, Porto Alegre - RS, CEP: 90010-150

E-mail: giovani.bulla@ufrgs.br

#### **RESUMO**

Etiquetas planares passivas de identificação por radiofrequência (*Radio Frequency Identification* – RFID) em ultra-alta frequência (*Ultra High Frequency* – UHF) têm sido amplamente estudadas para a utilização em superfícies metálicas e não metálicas, entre outros. Com o aumento de novas tendências relacionadas à Internet das Coisas (IOT), a necessidade de desenvolvimento de novos modelos de etiquetas que atendam com eficiência aos diversos paradigmas torna-se oportuna. Essa eficiência depende da necessidade de cada aplicação. Uma variedade considerável de fatores influencia na indicação do desempenho dessas etiquetas. Na busca por uma ampla possibilidade de quantificação, este artigo apresenta uma solução para avaliação: a implementação de uma Figura de Mérito (*Figure of Merit* – FoM) que englobe as principais métricas dessas etiquetas (alcance de leitura, área, sensibilidade do circuito integrado, custo do substrato e custo do processo de fabricação). Duas novas etiquetas passivas UHF RFID de estruturas diferentes foram projetadas para serem utilizadas na avaliação da FoM juntamente com as etiquetas existentes na literatura. Os resultados das simulações eletromagnéticas das etiquetas foram verificados através de medidas experimentais em ambiente controlado. Finalmente, é feita a aplicação da FoM nas etiquetas desenvolvidas



e existentes. A FoM proposta emprega métricas ainda não utilizadas e fornece a possibilidade de avaliação e quantificação de etiquetas, indicando que o valor derivado do mérito é particularmente útil não somente para comparação de etiquetas correlatas como para análise de decisões iniciais de projetos de etiquetas UHF RFID, tendo também potencial para aplicação em outros tipos de etiquetas.

**Palavras-chave:** figura de mérito, RFID, UHF, etiquetas passivas, superfícies metálicas, superfícies não metálicas. processo de fabricação de etiquetas.

### **ABSTRACT**

Passive planar radio frequency identification (RFID) tags in ultra-high frequency (UHF) have been widely studied for use on metallic and non-metallic surfaces, among others. With the increase of new trends related to the Internet of Things (IOT), the need to develop new tag models that efficiently meet the various paradigms becomes timely. This efficiency depends on the need of each application. A considerable variety of factors influence the performance of these tags. In the search for a broad quantification possibility, this paper presents a solution for evaluation: the implementation of a Figure of Merit (FoM) that encompasses the main metrics of these tags (read range, area, IC sensitivity, substrate cost, and manufacturing process cost). Two new passive UHF RFID tags of different structures were designed to be used for FoM evaluation along with existing tags in the literature. The results of the electromagnetic simulations of the tags were verified by experimental measurements in a controlled environment. Finally, the application of the FoM to the developed and existing labels is performed. The proposed FoM employs metrics not yet used and provides the possibility of label evaluation and quantification, indicating that the derived figure of merit is particularly useful not only for comparison of correlated labels but for analysis of initial design decisions for UHF RFID labels, and also has potential for application to other types of labels.

**Keywords:** figure of merit, RFID, UHF, passive tags, metallic surfaces, non-metallic surfaces. label manufacturing process.

## **1 INTRODUÇÃO**

A identificação por radiofrequência (RFID) é uma tecnologia amplamente difundida, que permite identificar objetos através de ondas eletromagnéticas [1]. Um sistema RFID permite que as informações armazenadas na etiqueta (antena e circuito integrado) colocada em um objeto sejam rastreadas remotamente por um equipamento de leitura.



Sistemas RFID podem ser classificados de acordo com a fonte de alimentação de energia da etiqueta como: ativo ou passivo e também com base na frequência do sinal. Os sistemas que operam na faixa de ultra-alta frequência (UHF) entre 860 MHz e 960 MHz têm como característica a obtenção de um maior alcance de leitura [2].

Até 2022 era estimado que o mercado total de RFID movimentaria cerca de US\$ 13 bilhões, enquanto que, para as etiquetas RFID passivas alcançaria em torno de 5 US\$ bilhões [3]. Esses números motivam as pesquisas para a redução do custo das etiquetas e para uma ferramenta de comparação entre as diversas características da etiqueta para o desenvolvimento de um projeto otimizado.

Obter uma etiqueta com desempenho satisfatório e custo mínimo é fundamental, porém em muitos casos etiquetas de RFID são projetadas para atender objetivos específicos como: alcance de leitura, área, custo do substrato e fator de custo do processo de fabricação.

A definição de uma Figura de Mérito (FoM) corresponde a uma ferramenta que pode ser utilizada em projetos de etiquetas passivas UHF RFID para auxiliar na definição de requisitos específicos de diferentes aplicações. Algumas FoMs são somente obtidas após sua fabricação, através de resultados simulados como em [4], dificultando assim a possibilidade de quantificação prévia da etiqueta. Outras FoMs incluem na sua equação a análise das dimensões, mas fazem somente uma observação do processo de fabricação mais vantajoso [5], não tendo assim uma aplicação concreta para tomadas de decisões iniciais em projetos de desenvolvimento de etiquetas.

Desenvolver uma FoM que contenha uma ampla quantidade de características até então não incluídas nas FoMs existentes nas bibliografias torna-se uma ferramenta que poderá ser usada não somente para tomada de decisões em projetos iniciais, mas também para avaliações de etiquetas existentes.



## **2 PARÂMETROS FUNDAMENTAIS DE ANTENAS EM PROJETOS DE ETIQUETAS RFID**

Uma variedade considerável de fatores influencia na determinação do desempenho das etiquetas. Em termos de comparação, a miniaturização, o amplo alcance de leitura e o baixo custo são relevantes, bem como o processo de fabricação das etiquetas.

Fazendo uma análise de etiquetas que tenham mesma frequência, área, circuito integrado (CI) e processo de fabricação será percebido que para substratos melhores como podemos citar os substratos cerâmicos o alcance de leitura será maior devido ao fato de que esse tipo de substrato apresenta um tangente de perdas muito baixa, porém seu custo é elevado. Refazendo a mesma análise para um substrato de baixo custo como podemos citar o substrato tipo FR4 que possui um tangente de perdas maior será percebido que o alcance de leitura terá um valor menor. Com essa análise podemos perceber que o custo do substrato está diretamente ligado ao desempenho da etiqueta.

Analisando agora etiquetas com mesma frequência, substrato, circuito integrado e processo de fabricação pode-se perceber que etiquetas que possuem maior dimensão terão conseqüentemente um maior custo devido à quantidade de material que será utilizado e como irão dispor de uma área maior para casamento de impedância através de alterações na geometria, as etiquetas irão apresentar um melhor desempenho com relação ao alcance de leitura.

O desempenho das etiquetas está relacionado também ao tipo de CI utilizado, circuitos integrados que possuem menor sensibilidade (potência necessária para ativar o CI) apresentarão maior alcance de leitura e maior custo.

Etiquetas cujos métodos não levam em consideração as necessidades e a agilidade dos processos de fabricação em larga escala irão apresentar um maior custo, pois necessitarão de um tempo maior para fabricação de cada unidade.

Enfim, agregar um fator de custo de processo de fabricação na avaliação de etiquetas, principalmente em etiquetas UHF RFID que são as mais utilizadas atualmente, é uma contribuição de grande valia, pois se refere a informações



específicas/complexas que muitas vezes não são disponibilizadas ficando em domínio apenas dos fabricantes.

Vale ressaltar também que essas informações de custo dos processos, mesmo que não sejam utilizadas para cálculos da FoM serão extremamente úteis para análise em projetos de antenas em diferentes tecnologias.

### 3 ALCANCE DE LEITURA

O alcance de leitura normalmente é definido como o objetivo principal em projetos sendo um dos mais importantes parâmetros para caracterizar o desempenho de etiquetas RFID. Esta é a máxima distância que o leitor pode detectar o sinal refletido da etiqueta via retro espalhamento (*backscattering*). Como a sensibilidade do leitor é tipicamente alta em relação à etiqueta, o limiar de resposta da etiqueta define a máxima distância de leitura. O alcance de leitura é sensível, entre outros, à orientação da etiqueta, ao material sobre o qual a etiqueta está colocada e ao ambiente de propagação.

A equação do alcance de leitura leva em consideração o comprimento de onda, a potência transmitida pelo leitor, o ganho do transmissor, a Potência Efetiva Isotropicamente Irradiada (EIRP), o ganho do receptor e o limite mínimo de potência necessária para ativar o CI da etiqueta conhecido como sensibilidade do CI.

Assumindo condições de propagação no espaço livre, o máximo alcance de leitura  $R$  pode ser calculado usando a equação 1 [6].

$$R = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{P_t G_t G_r \tau}{P_{th}}} |\hat{\rho}_t \cdot \hat{\rho}_r|^2 \quad (1)$$

Onde:

$\lambda$  é o comprimento de onda,  $P_t$  é a potência transmitida pelo leitor,  $G_t$  é o ganho do transmissor/da antena do leitor,  $P_t G_t$  é a potência efetiva isotropicamente radiada (EIRP),  $G_r$  é o ganho do receptor/da antena da etiqueta simulada,  $P_{th}$  é o limite mínimo de potência necessária para ativar o CI da etiqueta,  $\hat{\rho}_t$  é o vetor unitário de polarização da antena transmissora,  $\hat{\rho}_r$  é o vetor unitário de polarização da antena receptora onde  $|\hat{\rho}_t \cdot \hat{\rho}_r|^2 = 1$  quando há casamento de polarização entre as mesmas e  $\tau$  é o coeficiente de transmissão de potência dado pela equação 2 [6]:



$$\tau = \frac{4R_c R_a}{|Z_c + Z_a|^2}, \quad 0 \leq \tau \leq 1 \quad (2)$$

Onde:

$Z_a = R_a + jX_a$  é a impedância complexa da antena, sendo  $R_a$  é a parte resistiva da antena e  $X_a$  a parte reativa imaginária da antena.  $Z_c = R_c - jX_c$  é a impedância complexa do CI, sendo  $R_c$  é a parte resistiva do CI e  $X_c$  a parte reativa imaginária do CI.

Os coeficientes de reflexão e de transmissão indicam também as condições de máxima ou nenhuma transferência de potência, isso ocorre respectivamente quando  $\tau = 1$  ( $|\Gamma| = 0$ ) ou  $\tau = 0$  ( $|\Gamma| = 1$ ). A variação entre os limites 0 e 1 referem-se à reflexão ou transmissão parcial de potência.

As potências dissipadas nos resistores  $R_c$  e  $R_a$  serão máximas e iguais quando ocorrer o casamento de impedâncias entre a antena e o CI ( $Z_c = Z_a^*$ ). A identificação de descasamento pode ser feita através de um coeficiente de reflexão que relaciona as amplitudes complexas das ondas refletida e incidente.

Quando o CI é conectado diretamente na antena não existem linhas de transmissão conectando a antena e a carga podendo então utilizar a definição de coeficiente de reflexão de potência  $\Gamma$  [7] que é dado pela equação (3):

$$\Gamma = \frac{Z_c - Z_a^*}{Z_c + Z_a^*} \quad (3)$$

Onde:

(\*) representa o complexo conjugado.

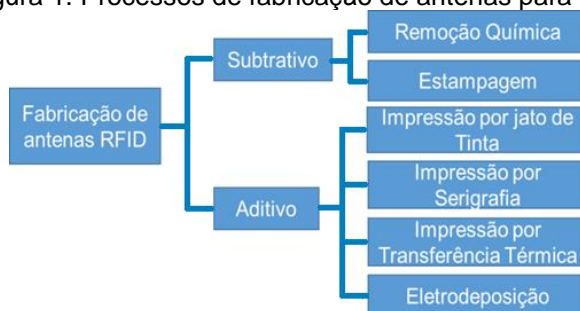
#### **4 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO**

Existem diversos processos de fabricação de antenas UHF RFID, porém há diferenças significativas entre os custos de fabricação da antena e também no desempenho máximo alcançável em cada uma das seguintes tecnologias: Remoção química, Impressão por Jato de tinta, Impressão por Serigrafia, Impressão por Transferência Térmica, Eletrodeposição e Sistema de Fabricação por Corte.



A Figura 1 mostra os processos de fabricação considerados neste artigo.

Figura 1. Processos de fabricação de antenas para RFID.



Fonte: Autores

#### 4.1 REMOÇÃO QUÍMICA (OU ALUMINUM ETCHING)

É o processo mais empregado, que domina o mercado mundial e produz a antena de melhor qualidade devido à espessura da camada de alumínio. O custo em equipamentos é médio, porém, há uma diferença significativa dependendo da empresa/país de origem da aquisição, sendo menor para os equipamentos chineses. A qualidade da antena é definida pela qualidade da impressão da máscara. O custo variável é dominado pelo custo da matéria prima principal, ou seja, do laminado composto de 10 % de alumínio (Al) + 90% de polietileno tereftalato (PET). Com a triplicação do volume, há uma redução no custo total de fabricação superior a 10%.

Como o processo é semelhante ao de fabricação de placas de circuito impresso, usando os mesmos produtos químicos, uma forma de redução de custo seria adquirir parceria com fabricantes de placas de circuito impresso locais. Para se chegar a custos comparados aos dos fornecedores chineses é necessário adquirir o laminado PET + Al por menor valor e reduzir os custos de internação (impostos). Outra alternativa de redução de custo seria reduzir a camada de PET de 50  $\mu\text{m}$  para 38  $\mu\text{m}$ , porém um PET mais fino fragiliza o substrato na hora da cura da solda do CI durante a montagem da etiqueta e é menos resistente à temperatura, enrugando mais facilmente, para este caso, deverão ocorrer alterações no processo de cura, como: ajuste fino da temperatura combinado com a utilização de adesivos de solda com tempo de



cura mais rápida. Enfim, mesmo com todas essas possibilidades é praticamente impossível obter custos menores para produção em volume comparado com qualquer outra técnica.

#### 4.2 FABRICAÇÃO POR ESTAMPAGEM / CORTE (*CUTTING SYSTEM*)

Trata-se de um processo extremamente simples que emprega apenas uma matéria prima, no caso a mesma já utilizada por outras técnicas como o *Aluminum Etching*, e também apenas um equipamento, totalmente automático.

O custo do equipamento é elevado, o que torna o investimento inicial muito elevado. No entanto, como a capacidade produtiva é muito grande, o custo da amortização/peça passa a ser atrativo para grandes volumes. Na velocidade máxima de 40 m/min, o equipamento é capaz de produzir antenas do modelo JBF (25 mm de passo) indicado na Fig. 3 a uma taxa de 32.000 peças/hora. Dessa forma, um único equipamento é capaz de produzir 200 milhões de peças, desse modelo, em um ano, operando em 3 turnos.

O único custo de material nesta técnica é o laminado de alumínio, que pode ser o mesmo utilizado no processo de remoção química. Outro custo é o da ferramenta de corte, porém como é possível fabricar um grande volume de peças com a mesma ferramenta, o impacto no custo é baixo. Os demais custos são insignificantes, sem impacto no custo final da etiqueta.

#### 4.3 IMPRESSÃO POR JATO DE TINTA

Os maiores custos são, respectivamente: a impressora, o laminado e a tinta. O que dificulta a viabilidade comercial dessa tecnologia não é o custo da tinta, é o custo das impressoras, pois não existem impressoras ou cabeçotes industriais com velocidade suficiente para produção em alto volume a custo baixo. O custo dos equipamentos depende do tipo, tamanho e quantidade de bocais do cabeçote. No entanto, mesmo uma impressora com elevado número de bocais conseguiria imprimir aproximadamente 10 milhões de antenas/ano, isso eleva o investimento necessário para produção em volume. Pode vir a





competir com *Aluminum Etching* caso venham a surgir impressoras/cabeçotes mais velozes.

O custo do substrato também representa potencial de redução, pode ser empregado substrato de papel, mas o papel necessita de tratamento superficial para melhorar a adesão da tinta, também precisa ser resistente à tração para resistir ao processo de fabricação rolo a rolo e resistir às temperaturas do tratamento térmico (cura da tinta). Se for empregado substrato de PET, apesar de não conter a camada metálica, como no caso do *Aluminum Etching*, a superfície do PET necessita de tratamento extra para garantir a boa adesão e definição da impressão.

Os custos de mão de obra e energia são muito baixos nessa tecnologia, as máquinas são automáticas e o consumo de energia é baixo, então esses custos não interferem no comparativo das tecnologias. Imprimir por rotogravura pode deixar o processo competitivo, mas precisa desenvolver/adaptar a impressora.

#### 4.4 IMPRESSÃO POR SERIGRAFIA (*SCREEN PRINTING*)

Técnica simples e de uso comum na indústria de eletrônica. O investimento em equipamentos é baixo e a capacidade de produção é alta. Na serigrafia, em função da presença de um veículo não condutivo, são necessários elevados percentuais de sólidos, entre 50 e 70% para produção de tintas com condutividade e viscosidade adequadas. O veículo é formado por solventes e aditivos, que são diversos químicos utilizados para conferir as propriedades necessárias e desejáveis para o processo de impressão onde os resultados são satisfatórios apenas para percentuais a partir de 60% de prata. Esse elevado percentual de prata faz com que os custos das pastas/tintas para serigrafia sejam significativamente mais elevados comparados às tintas para impressão a jato de tinta.

Para diminuir o custo, uma alternativa é reduzir a espessura da camada de tinta referente ao elemento irradiante, sendo possível por meio de ajustes do processo de impressão e estêncil podendo chegar a 8  $\mu\text{m}$ . A desvantagem é que



através dessa técnica não é possível imprimir camadas muito finas, menores que 8 a 10  $\mu\text{m}$ , por exemplo, o que aumenta o consumo de matéria-prima e consequentemente o custo.

O custo do substrato pode ser considerado o mesmo empregado na técnica de jato de tinta, inclusive valem as mesmas considerações de tratamento superficial e resistência. Da mesma forma, a serigrafia pode ser realizada sobre papel ou PET.

Os custos de mão de obra e energia são muito baixos nessa tecnologia, as máquinas são automáticas e o consumo de energia é baixo, portanto esses custos não interferem no comparativo das tecnologias.

#### 4.5 ELETRODEPOSIÇÃO

Técnica mais indicada para a deposição de camadas mais espessas. O custo dos equipamentos de eletrodeposição é elevado. Há no mercado nacional diversos fabricantes de equipamentos de eletrodeposição, porém para deposição em placas ou peças mecânicas, não são utilizados equipamentos rolo a rolo, precisariam ser adaptados. O controle do processo precisa ser muito bom devido às baixas espessuras. Uma antena para etiquetas UHF necessita de apenas 2  $\mu\text{m}$  de cobre para funcionar bem. Isso requer um equipamento com excelente controle de concentração, pH e temperatura, ou seja, bem superior aos equipamentos existentes no mercado nacional. A vantagem é que os equipamentos têm elevadíssima capacidade de produção, podem ser usados para a fabricação de antenas para etiquetas LF e HF também, já que é possível depositar camadas espessas, como por exemplo 10  $\mu\text{m}$  de cobre, bastando assim aumentar o tempo de deposição.

Quanto ao custo variável, acaba sendo elevado também porque é necessário imprimir a camada denominada semente e depois depositar o cobre. Mesmo trabalhando com reposição e filtragem dos químicos há consumo e custos de tratamento de efluentes.



#### 4.6 IMPRESSÃO POR TRANSFERÊNCIA TÉRMICA

O custo dessa impressora depende da velocidade e resolução e o custo das fitas de transferência térmica conhecidas como *ribbons* depende da quantidade a ser adquirida. O custo do substrato pode ser considerado o mesmo das técnicas anteriores. Essa técnica de impressão pode ser usada sobre diferentes substratos de PET ou papel, permitindo a obtenção de uma camada de metal impressa (alumínio) de apenas 0,5  $\mu\text{m}$  de espessura com uma excelente qualidade.

A Tabela 1 mostra o fator do custo de fabricação unitário, calculado para as diferentes tecnologias pesquisadas e normalizado com o custo do tecnologia *Etching*, por ser o processo que fornece as etiquetas mais baratas existentes no mercado atual.

Tabela 1. Fator de custo dos processos de fabricação por antena

Processo de Fabricação	Fator de custo
Remoção química	1
Estampagem	1,4
Impressão por Jato de tinta	2,3
Impressão por Serigrafia	3
Eletrodeposição	3,2
Impressão por Transferência Térmica	3,9

Fonte: Autores

#### 5 ELABORAÇÃO DA FIGURA DE MÉRITO

Uma nova FoM denominada ( $FOM_{JB}$ ) foi desenvolvida para realizar a análise comparativa de etiquetas RFID passivas em UHF e auxiliar nos projetos de aplicações destas em superfícies metálicas e não metálicas.

A equação (4) leva em consideração o alcance de leitura normalizado pela sensibilidade do CI, a área da etiqueta, o custo do substrato e o fator do custo do processo de fabricação.

$$FOM_{JB} = 10 \log \left( \frac{R^*}{A \times C_s \times F_{CP}} \right) \quad (4)$$



Onde:

$A$  é o valor calculado referente a área da etiqueta [ $\text{mm}^2$ ],  $C_s$  é o custo do substrato utilizado na antena [ $\text{R\$/mm}^2$ ],  $F_{CP}$  é o fator de custo do processo de fabricação normalizado com o custo do processo *Etching* e  $R^*$  representa o valor medido do alcance de leitura da antena [metros] normalizado com o valor da sensibilidade  $P_{th}$  [dBm] do CI a ser utilizado  $R^* = R/P_{th}$  [8].

A normalização do alcance de leitura medido é feita dividindo a valor do alcance de leitura  $R$  da equação (1) pelo valor da sensibilidade do CI indicada na especificação/*Datasheet*.

A  $FOM_{JB}$  apresentará um valor maior quanto maior for o alcance de leitura da antena, e também apresentará valores maiores para antenas com menor área, menor custo do substrato e menor custo de processo de fabricação, devido à proporcionalidade indireta da equação (4).

Mesmo que uma alteração das unidades não gerasse influência na comparação das etiquetas, as dimensões utilizadas na equação (4) foram expressas em unidades menores, por exemplo, milímetros quadrados para a área da etiqueta e reais por milímetro quadrado para o custo do substrato são mais frequentes na tecnologia atual e mais próximas as dimensões miniaturizadas existentes.

Conseqüentemente, a alteração da resposta de linear para logaritmo também não iria acarretar alteração, porém a opção da alteração para dB se deve ao fato de que em algum momento as comparações entre diferentes etiquetas resultariam em respostas com diferentes ordens de grandeza.

## **6 PROJETO DAS ANTENAS**

### **6.1 ETIQUETA PLANAR PASSIVA UHF RFID PARA SUPERFÍCIES METÁLICAS**

O projeto de desenvolvimento de uma etiqueta passiva planar UHF RFID para utilização em superfícies metálicas foi baseado na antena PIFA. Para a estrutura da etiqueta foi necessário definir o CI, o tipo de solda do CI, o substrato dielétrico e o metal a ser utilizado.

O CI utilizado foi o Higgs-3 [9] que atua na faixa de frequência de operação de 860 MHz a 960 MHz, trata-se de um CI passivo com resistência paralela de



entrada equivalente  $R_p = 1500 \Omega$ , capacitância equivalente paralela  $C_p = 0,85$  pF e sensibilidade de leitura  $P_{th} = -18$  dBm. A impedância complexa do CI na frequência de 915 MHz é  $Z_c = 27,43 - j 200,98 \Omega$ .

A escolha do tipo de solda para conexão do CI no metal do elemento irradiante da antena foi feita considerando a dificuldade de solda em alumínio e também a possibilidade de curto-circuito do CI devido as miniaturização do mesmo, onde o escolhido foi o adesivo condutivo anisotrópico modelo ACA268 [10] por ser o processo de solda mais utilizado e mais rápido, por necessitar de temperaturas em torno de  $150^\circ\text{C}$  para seu processo de cura, que são compatíveis com a maioria dos substratos e por conduzir em apenas uma direção, ou seja, as partículas condutivas indicadas quando submetidas à pressão e temperatura indicadas pelo fabricante irão conduzir apenas na direção vertical, evitando a possibilidade de curto-circuito nos terminais do CI.

O substrato escolhido foi o Tereftalato de Polietileno (PET) em formato de placa, considerado de baixo custo e classificado quimicamente como um polímero termoplástico semicristalino atóxico da família dos poliésteres. É um material leve e de alta resistência mecânica (impacto) e química. Pode ser obtido por meio de reação entre o Dimetil Tereftalato (DMT) ou Ácido Tereftálico (PTA) e o etileno glicol (EG). Suporta a temperatura de  $150^\circ\text{C}$  necessária no momento da cura do adesivo. O substrato escolhido foi o PET com adição de Glicol (PET-G), disponível comercialmente para aquisição em pequena escala, possuindo permissividade relativa  $\epsilon_r = 3,37$  e uma baixa tangente de perdas  $\tan\delta = 0,0208$ . Dentre as espessuras disponíveis, a escolhida foi a mais espessa, de 6 mm, pela maior possibilidade de não ocorrência de inversão de fase da onda eletromagnética.

Para as partes metálicas da antena (elemento irradiante, plano de terra e curto circuito), a opção escolhida foi o laminado, por ser usualmente utilizado em antenas RFID e ter um custo baixo. O laminado é composto por uma camada de PET filme com espessura de  $50 \mu\text{m}$  e uma camada de alumínio com espessura de  $10 \mu\text{m}$  e condutividade  $\sigma = 38 \times 10^6$  S/m.



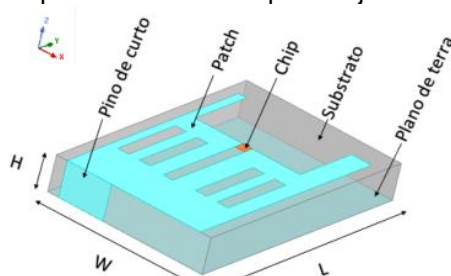
O tecnologia de fabricação escolhida foi o processo *Etching*, pela disponibilidade dos equipamentos, facilidade de construção do protótipo, baixo custo e possibilidade de implementação em processos de larga escala.

Enfim, a análise da escolha da geometria foi feita considerando a possibilidade de utilização de vários graus de liberdade para obter um melhor casamento de impedância. A técnica de fendas escolhida foi o uso de reentrâncias permitindo cortes precisos no laminado utilizando equipamentos de baixo custo.

As dimensões iniciais das antenas foram calculadas visando um máximo alcance de leitura ( $R$ ) e posteriormente otimizadas para obter um melhor casamento de impedância, utilizando o software HFSS [11] na frequência de 915 MHz e conseqüentemente comprimento de onda de  $\lambda_0 = 327,64\text{mm}$ .

A Fig. 2 mostra a composição da antena dividida em 3 partes: um plano de terra ocupando toda a parte inferior da antena conectado lateralmente por uma conexão de curto ao elemento irradiante que fica na parte superior da antena, existindo ainda um substrato entre o plano de terra e o elemento irradiante, além de um CI inserido na fenda. A antena projetada apresentou como dimensões finais  $46,1 \times 28,58 \times 6 \text{ mm}^3$  ( $L \times W \times H$ ).

Fig. 2. Etiqueta desenvolvida para objetos metálicos.



Fonte: Autores

### 6.3 ETIQUETA PLANAR PASSIVA UHF RFID PARA SUPERFÍCIES NÃO METÁLICAS

O tipo de antena escolhida para desenvolvimento da etiqueta planar UHF RFID para superfícies não metálicas foi a antena com meandros.



O CI utilizado foi o modelo Monza R6 [12], possui dimensões  $464,1 \mu\text{m} \times 400 \mu\text{m}$  ( $W \times L$ ), faixa de frequência de operação de 860 MHz a 960 MHz, resistência paralela de entrada equivalente  $R_p = 1200 \Omega$ , capacitância total =  $1,44 \text{ pF}$  (sendo a Capacitância equivalente paralela  $C_p = 1,23 \text{ pF}$  e a Capacitância parasita  $C_{\text{mount}} = 0,21 \text{ pF}$ ) e sensibilidade de leitura  $P_{th} = -20 \text{ dBm}$ . A impedância complexa do CI é calculada através do modelo circuitual simplificado que para a frequência de 915 MHz foi de  $Z_c = 12,03 - j119,58 \Omega$ .

O adesivo escolhido foi o ACA e o substrato foi o PET filme com permissividade relativa  $\epsilon_r = 3$ , espessura de  $50 \mu\text{m}$  e tangente de perdas  $\tan\delta = 0,002$ . O processo de fabricação escolhido para construção do protótipo da etiqueta foi o processo de Transferência Térmica.

O processo para determinação das dimensões utilizado no projeto será descrito em três etapas que analisam os componentes individuais da etiqueta e como eles interagem uns com os outros.

#### ETAPA 1:

A primeira definição com relação à largura da espira indutora foi relacionada à dimensão do CI a ser conectado no mesmo, sendo reservada uma largura mínima devido à necessidade de conexão com o CI.

#### ETAPA 2:

Como o formato da espira indutora pode assumir praticamente qualquer forma, desde que complete o laço e mantenha o casamento de impedância com o CI que será inserido. A espira indutora foi projetada utilizando análises paramétricas e de otimização do software HFSS, considerando as variáveis relacionadas.

A espira indutora tem três variáveis: a largura do traço, a área do laço e o comprimento do traço. Como regra, utiliza-se uma largura de traço maior para minimizar a perda ôhmica, portanto nas primeiras análises foram utilizadas dimensões maiores nas variações simuladas.

Foram verificadas algumas tendências relacionadas às simulações referentes à largura do traço e a forma da espira indutora. Foi percebido que



traços mais largos reduziam a perda ôhmica, mas a área da espira indutora tinha que crescer para compensar a indutância reduzida.

A segunda observação foi com relação à área da espira indutora e a forma, foi visto que se a forma estivesse mais próxima do formato circular ou quadrada, a área necessária para obter a mesma indutância seria menor do que se a forma fosse longa e estreita.

A última percepção mostrou que o formato provavelmente será determinado pelo requisito de tamanho. Para uma etiqueta longa e estreita, uma forma de espira circular ou quadrada não será adequada.

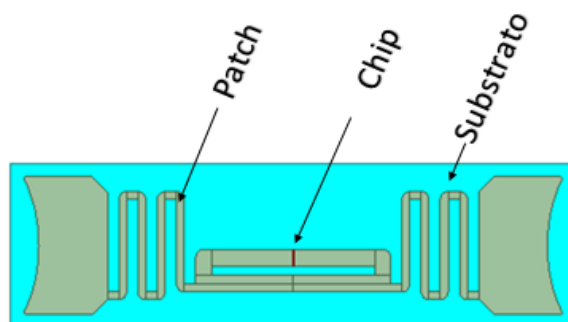
### ETAPA 3:

O dipolo foi projetado atendendo a característica de comprimento de onda, foram realizadas simulações de análise paramétrica e otimização para aumentar o alcance, alterando também as variáveis: largura do traço, comprimento do dipolo e distância entre os dipolos.

A frequência utilizada inicialmente foi um pouco menor que a frequência desejada, em torno de 890 MHz, devido ao fato de que a frequência de ressonância aumenta com a conexão da espira indutora no dipolo.

Fig. 3 mostra a antena projetada para utilização em superfície não metálica, com dimensões  $70 \times 14 \times 0,05 \text{ mm}^3$  (L x W x H). As partes metálicas em alumínio, pelo processo de Transferência Térmica apresentam condutividade  $\sigma = 38 \times 10^6 \text{ S/m}$  e espessura  $T = 5 \mu\text{m}$ .

Fig. 3. Antena para superfície não metálica.



Fonte: Autores





## 7 RESULTADOS

### 7.1 PARÂMETROS DAS SIMULAÇÕES

Todas as simulações foram feitas utilizando o software comercial HFSS® que é um programa desenvolvido pela Ansys® para a simulação de campos eletromagnéticos em estruturas em geral [11].

O método escolhido para as simulações foi o Método de elementos finitos (*Finite Element Method* - FEM) que é o principal e mais tradicional no software HFSS. Nas simulações iniciais foi escolhida a técnica Interativa, pois fornece simulações com menor tempo de processamento e nas simulações finais foi selecionada a opção Direta que é mais exata, porém mais demorada do ponto de vista computacional.

O tipo de solução escolhida define o tipo de resultado, como as excitações são definidas e a convergência. A solução escolhida foi a *Driven Modal* que é mais adequada para o cálculo dos parâmetros de espalhamento em estruturas passivas de alta frequência.

A condição de contorno escolhida foi à excitação através de *Lumped Ports* que é definida para excitações que estão presentes internamente na estrutura sendo um pulso gaussiano senoidal modulado no domínio do tempo, cuja simulação é terminada quando a excitação do sinal se torna desprezível. Com base na observação da convergência sobre o final do pulso gaussiano, foram testadas diversas quantidades de períodos, foi definido que 6 períodos atenderiam ao critério de convergência, incluindo uma margem de segurança de tempo restante.

No software, o modelo geométrico é automaticamente dividido em um grande número de tetraedros, onde um único tetraedro é uma pirâmide. Essa coleção de tetraedros é referida como malha de elementos finitos. É possível refinar a malha, ou seja, diminuir o tamanho dos tetraedros e, conseqüentemente, aumentar a quantidade deles, a fim de obter uma maior precisão nos resultados. O HFSS trabalha com malha adaptativa, que é o método empregado para que a malha mais eficiente seja utilizada para



resolução. Este método refina a malha nos locais onde a variação de campo elétrico é maior.

Para que o software calculasse o alcance de leitura, foi necessária a implementação da equação do alcance de leitura (1) e do coeficiente de transmissão (2), a partir disto as simulações foram realizadas no domínio do tempo na frequência de 915 MHz. Todas as análises paramétricas/otimizações foram feitas em função de um melhor alcance de leitura e em todas as simulações foi constatada a condição de convergência. Foram utilizados os valores de potência isotrópica radiada equivalente,  $P_t G_t = 4 \text{ W EIRP}$ .

## 7.2 PARÂMETROS DAS MEDIDAS

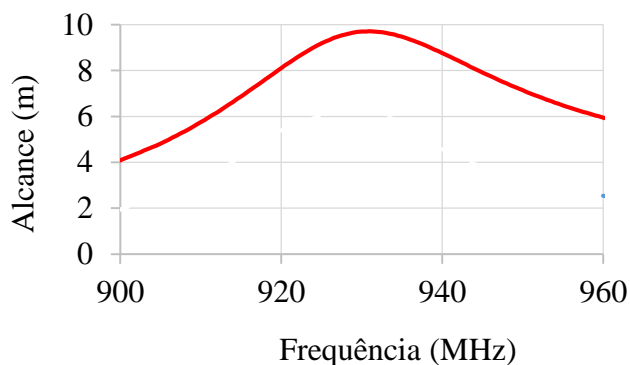
Com o intuito de obter valores mais precisos, foi necessária a medição dos protótipos em ambiente controlado utilizando uma câmara anecóica do fabricante Voyantic. A câmara é projetada para conter reflexões, tanto de ondas sonoras quanto de ondas eletromagnéticas e possui uma antena com polarização linear horizontal em seu interior.

## 7.3 RESULTADOS SIMULADOS

A etiqueta para superfície metálica foi simulada com todas as características indicadas no item IV, contendo uma base metálica de alumínio com dimensão de 130 × 130 mm e espessura de 3 mm. A base foi posicionada abaixo da etiqueta e centralizada com as bordas da etiqueta. A simulação indicou um alcance de leitura de cerca de 10 metros para a etiqueta, como ilustrado na Figura 4.



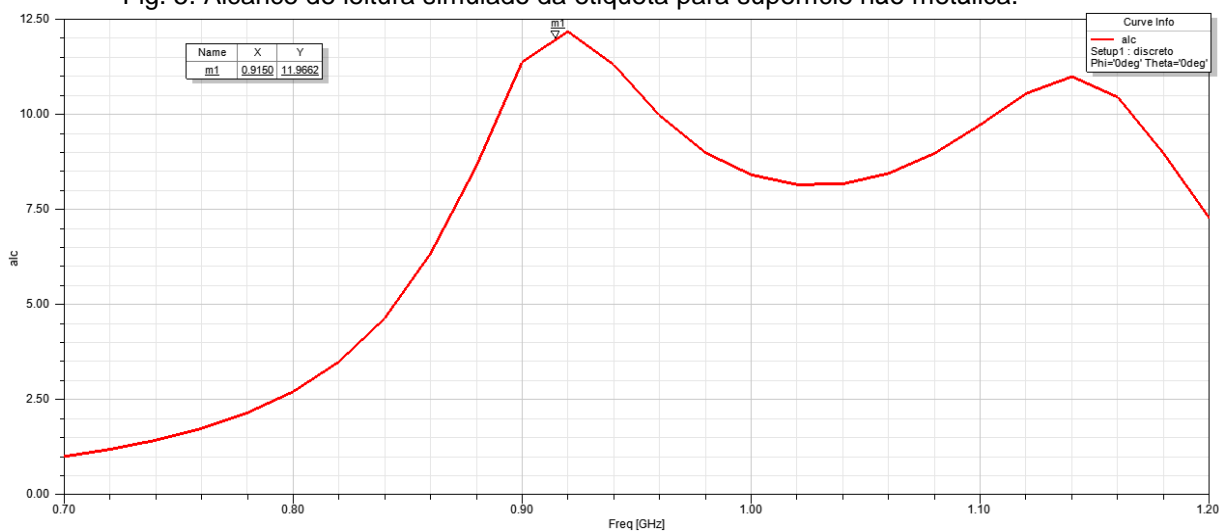
Fig. 4. Alcance de leitura simulado da etiqueta para superfície metálica.



Fonte: Autores

Para a etiqueta de superfície não metálica a simulação mostrou um alcance de leitura de aproximadamente 12 metros na frequência de 915 MHz, como ilustrado na Figura 5.

Fig. 5. Alcance de leitura simulado da etiqueta para superfície não metálica.

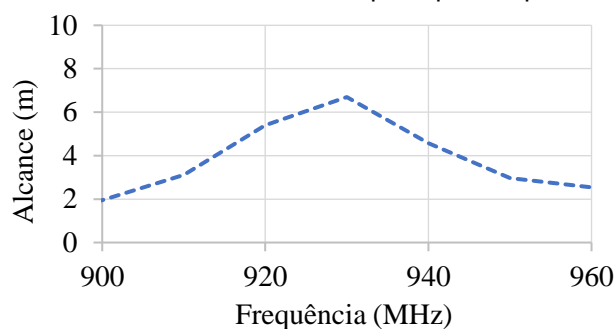


## 7.4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

O protótipo da etiqueta para superfície metálica apresentou um alcance de leitura de aproximadamente 7 metros, conforme mostra a Figura 6.



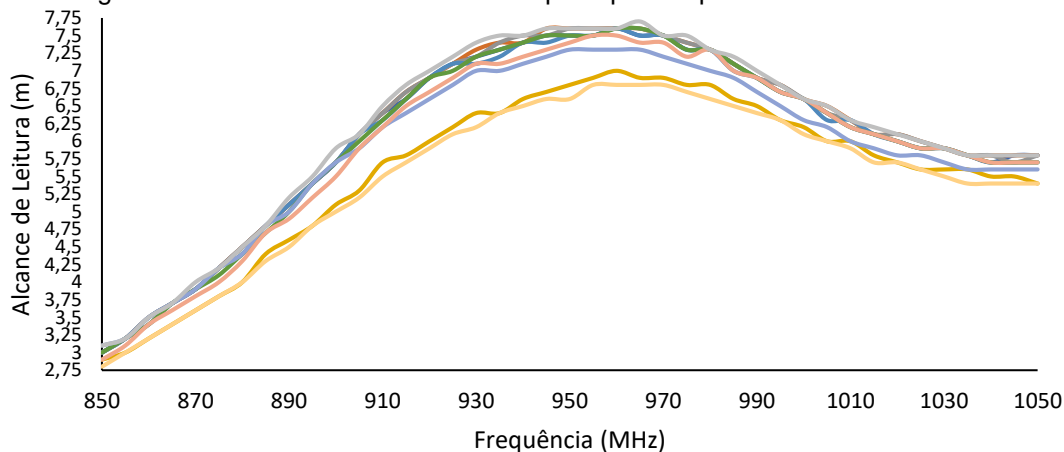
Fig. 6. Alcance de leitura medido da etiqueta para superfície metálica.



Fonte: Autores

Para a etiqueta de superfície não metálica foram confeccionados 10 protótipos para considerar uma correta reprodutibilidade. A Figura 7 mostra que os valores de alcance de leitura medidos ficaram entre 6 e 7 metros na faixa de interesse de 915 MHz.

Fig. 7. Alcance de leitura medido da etiqueta para superfície não metálica



Fonte: Autores

## 7.5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

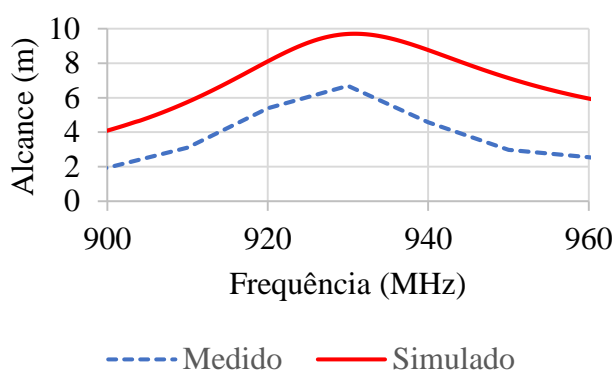
O resultado da Figura 8 mostra uma comparação entre simulação e medição para o protótipo da antena projetada para superfícies metálicas, em que é possível observar uma boa concordância entre os resultados numérico e experimental.

É possível observar, ainda, que houve um deslocamento na frequência para um valor superior à frequência central do projeto, que foi de 915 MHz. Essa



antena apresentou um alcance medido de aproximadamente 7 metros, inferior ao simulado, que apresentou 10 metros de alcance de leitura na frequência de 930 MHz.

Fig. 8. Comparação do alcance de leitura simulado e medido da etiqueta para superfície metálica.



Fonte: Autores

Levando em consideração que os protótipos foram fabricados manualmente, uma grande variabilidade de resultados pode ser esperada. A diferença entre o resultado simulado e medido é provavelmente devido: a construção manual do protótipo, a conexão manual das duas placas do substrato PET-G de 3 mm para alcançar a espessura final de 6 mm, a conexão manual do CI e a não consideração nas simulações das características e espessura do material utilizado para unir (Etil-Cianoacrilato) as duas placas de PET-G e também a não consideração da referida cola para conectar o laminado no substrato.

Referente a antena projetada para superfície não metálica, as medidas mostraram que houve uma variação de aproximadamente 1 metro de diferença no resultado do alcance de leitura dos 10 protótipos analisados, isso mostra que para etiquetas idênticas, as variações apenas na conexão do CI, mesmo sendo feitas em equipamentos industrializados, geram alterações significativas no resultado.

As possíveis diferenças entre os resultados simulados e medidos podem estar relacionadas com variações na pressão da impressora utilizada no



processo de Transferência Térmica que não fornece a mesma espessura metálica prevista na simulação.

## 7.6 RESULTADOS DA FIGURA DE MÉRITO

Para análise da nova Figura de Mérito foram utilizados os valores de alcance medido das duas antenas desenvolvidas e também foram utilizados os valores de alcance medidos indicados nos dados das antenas existentes na bibliografia.

A Tabela 2 mostra os valores calculados para a  $FoM_{JB}$  de antenas RFID para superfícies metálicas. Analisando os tipos de substratos utilizados na fabricação de antenas existentes na bibliografia, podemos chegar as seguintes conclusões:

Na referência [14] temos uma antena fabricada com substrato cerâmico que cujo custo é considerado alto, porém devido a sua tangente de perdas ser muito baixa acaba proporcionando um maior alcance.

A referência [15] apresenta uma antena com substrato Roger que é considerado um avanço em relação ao substrato FR4 por apresentar tangente de perdas menores.

O substrato FR4 apresentado na antena da referência [16] é o mais utilizado na construção de antenas, tem um custo baixo, porém apresenta uma tangente de perdas muito alta gerando alcances menores.

E por fim, analisando o substrato PET utilizado para projeto da antena deste artigo, o mesmo possui um custo considerado baixo, baixa tangente de perdas e a vantagem do substrato poder ser utilizado em temperaturas que suportam os processos de cura dos adesivos condutivos.

A análise da Figura de Mérito mostra que a antena desenvolvida neste artigo apresenta um mérito maior em detrimento às outras devido a utilização de um substrato de baixo custo que mesmo possuindo uma tangente de perdas menor do que de outros substratos de baixo custo (como FR4) acarreta em uma eficiência de radiação maior e conseqüentemente, um maior ganho.



A Tabela 3 mostra os valores calculados para a  $FoM_{JB}$  de antenas RFID para superfícies não metálicas. A tabela compara duas antenas com tipos diferentes de processo de fabricação, uma delas é a antena modelo E62 [13] fabricada pelo processo *Etching* sendo uma das antenas mais utilizada comercialmente e a outra trata-se da antena desenvolvida neste artigo pelo processo de fabricação *Thermal Transfer*. A limitação para o desenvolvimento de uma antena pelo processo *Thermal Transfer* e não pelo processo *Etching* se deu pelo fato de que para criar antenas com o substrato PET filme, é necessário utilizar equipamentos/linhas de processos de fabricação encontrados somente em empresas de produção em larga escala, por isso, utilizou-se o processo *Thermal Transfer* que necessita apenas de uma impressora específica como equipamento.

Mesmo utilizando o mesmo CI, o mesmo substrato e a mesma área, a  $FoM_{JB}$  da antena desenvolvida neste artigo para antenas RFID em superfícies não metálicas foi menor em detrimento à antena comercial, isso se deve ao fato da antena desenvolvida neste trabalho utilizar um processo de fabricação mais caro e apresentar um menor alcance de leitura.

Tabela 2. Resultado da figura de mérito para superfícies metálicas

Alcance de leitura (m)	Sensibilidade do CI (dBm)	Alcance de leitura normalizado com $P_{th}$	Área (mm <sup>2</sup> )	Substrato	Custo do Substrato [R\$/mm <sup>2</sup> ]	Processo de Fabricação	Fator de Custo do Processo de Fabricação	$FoM_{JB}$ (dB)	Referência
3	18	0,72	1072,5	Cerâmica DR36	0,0086	<i>Etching</i>	1	1,49	[14]
	18	0,35	3864	PET-G	0,0004	<i>Etching</i>	1	6,5	<b>Este artigo</b>
0,8	18	0,37	2571	Rogers RO3010	0,0005	<i>Etching</i>	1	5,56	[15]
0,5	15	0,36	537,6	PTFE/FR4	0,00035	<i>Etching</i>	1	2,81	[16]

Fonte: Autores

Tabela 3 Resultado da Figura de Mérito para superfícies não- metálicas

Alcance de leitura (m)	Sensibilidade do CI (dBm)	Alcance de leitura normalizado	Área (mm <sup>2</sup> )	Substrato	Custo do Substrato [R\$/mm <sup>2</sup> ]	Processo de Fabricação	Fator de Custo do Processo de	$FoM_{JB}$ (dB)	Referência
------------------------	---------------------------	--------------------------------	-------------------------	-----------	---	------------------------	-------------------------------	-----------------	------------



		do <i>Pth</i>	com				Fabrica ção		
2	-20	0,6	490	PET-Filme	0,00005	<i>Etching</i>	1	20,87	Modelo E62 R6 [13]
1	-20	0,55	630	PET-Filme	0,00005	<i>Etching</i>	1	12,42	Modelo E64 R6 [13]
,08	-20	0,4	490	PET-Filme	0,00005	<i>Thermal Transfer</i>	3,9	12,12	Este artigo
,1	-20	0,3	600	PET-Filme	0,00005	<i>Etching</i>	1	10	Modelo E61F R6 [13]
,2	-20	0,06	297	PET-Filme	0,00005	<i>Etching</i>	1	6,06	Modelo F62 R6 [13]

Fonte: Autores

Neste artigo as etiquetas disponíveis na literatura somente foram utilizadas para avaliação quando todos os dados necessários estavam descritos, não foram utilizadas informações estimadas ou intuitivas.

## 8 CONCLUSÕES

Neste artigo é apresentada uma nova Figura de Mérito para avaliação de etiquetas planares passivas UHF RFID para uso em superfícies metálicas e não metálicas. Foi visto que uma variação considerável de fatores (alcance, área, sensibilidade do CI, custo do substrato e custo do processo de fabricação) influenciam nas definições iniciais de projetos de antenas e na avaliação e comparação de antenas existente, portanto, desenvolver uma Figura de Mérito que possa auxiliar nas questões indicadas, se justifica.

Duas novas etiquetas planares passivas UHF RFID de estruturas diferentes foram criadas para avaliação através da nova Figura de Mérito, juntamente com antenas existentes na bibliografia. A primeira refere-se a uma antena para utilização em objetos metálicos e a segunda trata-se de uma antena para objetos não metálicos, desenvolvidas através dos processos de Remoção e Impressão por Transferência Térmica, respectivamente. As duas novas etiquetas projetadas mostraram-se uma boa alternativa para utilização em sistemas UHF RFID.





A Figura de Mérito desenvolvida emprega cinco variáveis correspondentes ao projeto de etiquetas RFID, fornecendo assim uma ampla possibilidade para quantificação da mesma, indicando que o valor derivado do mérito é adequado avaliação de etiquetas planares passivas UHF RFID existentes e também útil para auxiliar em projetos análogos, diminuindo assim, o tempo de solução nas tomadas de decisões.

Além disso, as informações contidas no levantamento realizado relativo às técnicas atuais de fabricação e a tabela desenvolvida sobre fatores de custo de processo de fabricação são de grande valia não somente para a utilização em antenas RFID, mas também para utilização em outros tipos de antenas.

Além disso, as antenas desenvolvidas apresentam bom desempenho na utilização em objetos metálicos e não metálicos e a Figura de Mérito resulta em um abrangente mecanismo de avaliação e comparação, tendo também potencial para a aplicação em outros tipos de antenas.

### **AGRADECIMENTOS**

"O presente artigo foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001".



## REFERÊNCIA

- [1] R. Want, "An introduction to RFID technology," IEEE Pervasive Computing, vol. 5, pp. 25-33, 2006.
- [2] K. Finkenzerler, RFID Handbook: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards and Identification, John Wiley & Sons, New York, NY, USA, 2nd edition, 2003.
- [3] IdTechEx, "RFID Forecasts, Players and Opportunities 2018-2028" [Online]. Available: <http://www.idtechex.com>
- [4] D. Bao, Z. Zou, M. Baghaei Nejad, Y. Qin and L. Zheng, "A Wirelessly Powered UWB RFID Sensor Tag With Time-Domain Analog-to-Information Interface," in IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 53, no. 8, pp. 2227-2239, Aug. 2018.
- [5] M.M. Khan et. al, "3.56-bits/cm Compact Inkjet Printed and Applications Specific Chipless RFID Tag" in IEEE Antennas and Wireless.
- [6] K. V. S. Rao, P. V. Nikitin and S. F. Lam, "Antenna design for UHF RFID tags: a review and a practical application", in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 53, no. 12, pp. 3870-3876, Dec. 2005.
- [7] KUROKAWA, K. An introduction to the theory of microwave circuits. Academic Press, 2012.
- [8] T. Björninen, L. Sydänheimo, L. Ukkonen e Y. Rahmat-Samii, "Avanços no design de antenas para etiquetas RFID UHF montáveis em itens condutores", em IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol. 56, n. 1, pp. 79-103, fevereiro de 2014, doi: 10.1109 / MAP.2014.6821761.
- [9] ALIEN. **Higgs 3 datasheet**. 3 p. 2012. Disponível em: <<https://www.alientechnology.com/products/ic/higgs-3/>>. Acesso em: 06 mar. 2016.
- [10] DELO. Anisotropic conductive adhesive: product specification. 4 p. 2015. Disponível em: <[https://www.deloadhesives.com/fileadmin/datasheet/DELO%20MONOPOX\\_AC265\\_%28TIDB-en%29.pdf](https://www.deloadhesives.com/fileadmin/datasheet/DELO%20MONOPOX_AC265_%28TIDB-en%29.pdf)>. Acesso em: 28 jan. 2017.
- [11] ANSYS. Ansys Corporation HFSS. Disponível em: [www.ansys.com](http://www.ansys.com)
- [12] IMPINJ. <https://support.impinj.com/hc/en-us/articles/202765328-Monza-R6-Product-Datasheet>.
- [13] CCRR. Grupo Colacril. Disponível em: <http://www.colacril.com.br/> Sept. 2015.



- [14] S. L. Soriano. and J. Parrón, "Parallel plate antenna for UHF RFID tags operating over metallic objects," 2016 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Davos, 2016, pp. 1-3.
- [15] ZUFFANELLI, S. *et al.* On-metal UHF-RFID passive tags based on complementary split-ring resonators. IET Microwaves, Antennas & Propagation, United Kingdom, v. 11, n. 7, p. 1040-1044, Jun. 2017.
- [16] ZHANG, J.; LONG, Y. A miniaturized via-patch loaded dual-layer RFID tag antenna for metallic object applications. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, New York, v. 12, p. 1184-1187, Sep. 2013.