



Artigo

## Estudo de antena *Patch* retangular para aplicação em redes sem fio de *IoT* com tecnologias *SIW* e *Slot*

José Rosenildo B. Silva <sup>[1]</sup> e Humberto D. de Andrade <sup>[2]</sup>

<sup>[1]</sup> Universidade Federal Rural do Semi-árido; j.rosenildobs@gmail.com

<sup>[2]</sup> Universidade Federal Rural do Semi-árido; humbertodionisio@ufersa.edu.br

Recebido: 08/05/2023;

Aceito: 22/12/2023;

Publicado: 26/12/2023.

**Resumo:** Com a evolução dos padrões de sistemas de comunicações sem fio e o advento da Internet das Coisas (*IoT*) surgiu a massificação dos dispositivos conectados às redes e volumes de dados cada vez maiores, tornando imprescindível o desenvolvimento de componentes capazes de atender às exigências que esse progresso requer. As antenas de microfita são componentes que exercem função essencial nesses sistemas, por serem dispositivos planares, de tamanho reduzido, com baixo custo de produção, fácil integração aos gabinetes dos equipamentos e desempenho adequado. Objetivando aperfeiçoar o desempenho das antenas presentes nos transceptores e equipamentos de usuários, reduzindo perdas na transformação das ondas eletromagnéticas guiadas nas linhas de transmissão em ondas eletromagnéticas irradiadas no espaço livre, esse trabalho propõe uma antena de microfita baseada em um *patch* retangular com a inserção apropriada do elemento *Slot* e da tecnologia *SIW* na estrutura do ressonador para operação em banda larga na faixa de frequência ISM 2,45 GHz. Com o auxílio dos softwares Scilab 6.1 e ANSYS HFSS® 2019 a antena foi matematicamente modelada e simulada, ajustando-se seus parâmetros para valores de interesse. Posteriormente alguns protótipos iniciais foram produzidos e testados utilizando o Analisador Vetorial de Redes (VNA) para validação dos resultados prévios. Diante das comparações entre os resultados teóricos simulados e os experimentos, é possível afirmar que a junção do elemento *Slot* à tecnologia *SIW* contribui para a mitigação da densidade superficial de corrente  $s$  e dos efeitos negativos dos campos próximos, melhorando o casamento de impedância e reduzindo as perdas por reflexão.

**Palavras-chave:** Antena *patch* retangular; Tecnologia *SIW*; Elemento *Slot*; Internet das coisas.

**Abstract:** With the evolution of wireless communications systems standards and the advent of the Internet of Things (*IoT*), emerged the massification of devices connected to networks and increasing data volumes, development of components capable of meeting the requirements that this progress requires. The microstrip antennas are components that play an essential role in these systems, because they are planar devices, of reduced size, with low production cost, easy integration to the equipment cabinets and adequate performance. Aiming to optimize the performance of antennas present in transceivers and users equipment, reducing losses in the transformation of guided electromagnetic waves in transmission lines into electromagnetic waves irradiated in free space, this work proposes a microfiche antenna based on a rectangular *patch* with the appropriate insertion of the insect feed elements, *Slot* and *SIW* technology in the resonator structure for broadband operation in the ISM 2.45 GHz frequency range. With the help of the software Scilab 6.1 and ANSYS HFSS 2019 the antenna was mathematically modeled and simulated, adjusting its parameters to value of interest. Later some initial prototypes were produced and tested using the Vector Network Analyzer (VNA) to validate the preliminary results. In view of the comparisons between the simulated theoretical results and the experiments, it is possible to state that the combination of the *Slot* element with the *SIW* technology contributes to the mitigation of the surface current density and the negative effects of the near fields, improving the impedance matching and reducing the losses by reflection.

**Key-words:** Rectangular *patch* antenna; *SIW* technology; Slot element; Internet of Things.

## 1. INTRODUÇÃO

Os avanços tecnológicos dos meios de comunicação estão intimamente ligados com a evolução dos materiais semicondutores, com o aprimoramento dos dispositivos eletroeletrônicos nos seus níveis físico e lógico, além da otimização e simplificação dos processos que envolvem a montagem das infraestruturas de rede. A comunicação síncrona e em massa exige o aperfeiçoamento de cada elemento que compõe as redes. Se a transmissão de dados entre emissor e receptor deve ocorrer obedecendo a parâmetros específicos como distância, direção, frequência, potência e volume de dados, os dispositivos devem ser desenvolvidos com componentes que permitam esse ajuste fino, evitando qualquer desperdício de material, espaço ou energia. Desse modo, cada componente deve ser objeto de estudo e otimização na busca pela maior eficiência.

Na atualidade, as redes de comunicação sem fio destacam-se pelo seu potencial e versatilidade, já que pacotes de dados contendo desde alguns bits até megabytes podem ser enviados ou recebidos a distâncias que também variam de alguns centímetros até bilhões de quilômetros, usando o espaço livre como meio de transmissão. Isso dependerá das tecnologias de hardware e software empregadas, devendo respeitar os limites do espectro definidos pela legislação da região de montagem da rede, como também os protocolos padronizados pelos institutos de pesquisa internacionalmente reconhecidos [1].

Em sintonia com a ascensão das comunicações acontecem as transformações desencadeadas pela quarta revolução industrial, centralizadas no desenvolvimento dos processos e produtos de forma mais autônoma e eficiente [2], criando um ambiente denominado Internet das Coisas (*Internet of Thing, IoT*), favorável à integração em rede de seres vivos, não vivos, animados ou inanimados, através de conjuntos de dispositivos que se comunicam de forma síncrona e autônoma [3]. Ainda não se pode afirmar a existência do apogeu da indústria 4.0 devido à dinâmica dessa revolução pujante, mas já está claro que um dos maiores desafios é a integração digital das cadeias produtivas com uma infraestrutura de rede adequada, tendo em vista as presentes limitações de conexão e tráfego de dados.

Uma das frentes de estudo que busca aliviar o gargalo da infraestrutura de rede sem fio, concentra os esforços em melhorar a transmissão e a recepção dos sinais otimizando as antenas. Tratando a antena como elemento fundamental no processo de comunicação sem fio, já que são responsáveis pela restrição da faixa de interesse do espectro eletromagnético, bem como pela maximização do aproveitamento da potência disponível no sinal, elas precisam ocupar espaços cada vez menores no interior dos equipamentos, corroborando com a tendência de miniaturização, além de melhorar suas características funcionais. Nesse sentido, uma das antenas de microfita mais utilizada em estudos é a tipo *Patch* retangular, pois mesmo com tamanho reduzido ela consegue obter uma largura de banda suficiente para transmitir quantidade de dados no modo banda larga [4]. Nesse tipo de antena os esforços são para integrar elementos que melhorem seus parâmetros, permitindo redução de espaço físico, ajustes na largura de banda, maior ou menor diretividade, entre outros.

Dentre os elementos comumente integrados nas antenas *Patch* retangular estão o *Slot* e o *SIW*. Este artigo tem como objetivo projetar, simular, analisar e comparar o desempenho de duas antenas operando com frequência dentro da faixa ISM 2,45GHz para aplicações industriais e científicas, sendo uma simplificada de referência e outra com o acréscimo dos elementos *Slot* e *SIW*. Os parâmetros avaliados serão a perda de retorno, o coeficiente de reflexão, relação de onda estacionária e impedância de entrada.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1. Internet das Coisas (IoT)

Com a evolução dos semicondutores, o avanço da microeletrônica permitiu a popularização de circuitos que podem ser adequados ou inseridos em equipamentos comuns do dia-a-dia, proporcionando a eles novas funcionalidades como sensoriamento, comunicação sem fio, sistemas operativos embarcados, tornando-os inteligentes e autônomos, permitindo inclusive que eles se conectem com a infraestrutura de rede e sejam acessados e controlados via internet de qualquer lugar do planeta. A efetivação dessa comunicação entre dispositivos de propósito geral configura o conceito de rede e estabelece a definição de internet das coisas [5]. Quando são conectados objetos com diferentes recursos em uma mesma rede, isso possibilita a criação de novas aplicações que vão desde a simples iluminação de uma ambiente até o monitoramento remoto de um paciente. O acúmulo de dispositivos ou a elevação no tráfego de dados esbarra nas limitações da infraestrutura de rede, provocando informações inconsistentes ou imprecisas.

A construção da *IoT* dá-se pela junção de diferentes tecnologias complementares que irão viabilizar a integração dos objetos ao mundo virtual. O primeiro passo é identificar o objeto, codificando-o. Tecnologias como RFID (*Radio Frequency Identification*) e IP (*Internet Protocol*) são empregadas para esse fim. Depois sensores captam as informações das variáveis do ambiente físico, ao passo que atuadores interagem e manipular essas variáveis de acordo com comandos recebidos de um sistema de controle autônomo ou do próprio usuário. A comunicação com a infraestrutura de rede pode ocorrer usando diversas tecnologias como RFID, Bluetooth, ZigBee, Wi-Fi, etc. Na parte computacional, o processamento dos algoritmos é executado por microcontroladores, processadores e FPGAs. A *IoT* pode disponibilizar diversos tipos de serviço como agregação de dados, coletando e organizando informações dos dispositivos, ou ainda identificação que mapeiam valores físicos para virtuais ao interesse do usuário. E por fim a semântica responsável pelo uso eficiente dos recursos da *IoT* e retirada dos conhecimentos disponíveis [6]. A Figura 1 mostra o esquema básico de construção da *IoT*.

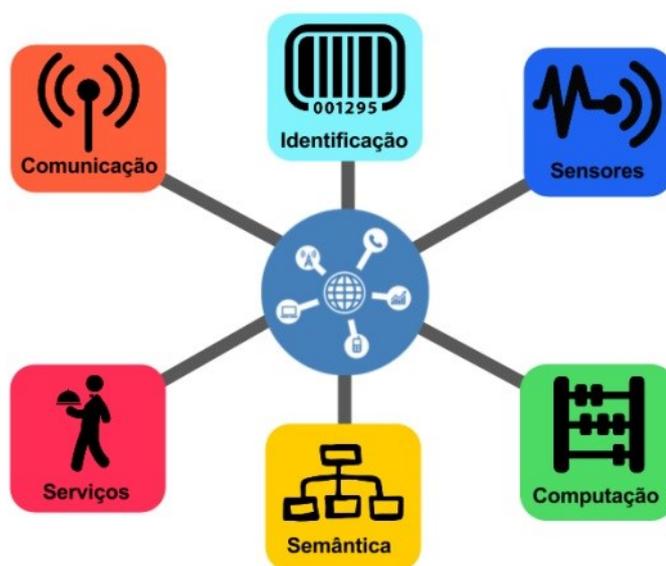


FIGURA 1. Blocos básicos da *IoT* [6].

## 2.2. Antena Patch Retangular

Antenas são dispositivos responsáveis pela transição entre a propagação das ondas eletromagnéticas guiadas nas linhas de transmissão e as ondas eletromagnéticas irradiadas em um meio livre. Essa transformação de energia é essencial para qualquer sistema de comunicação que utiliza a radiofrequência como método de transmissão de dados e deve ocorrer com a máxima eficiência [4]. As antenas de microfita são dispositivos planares que incorporam materiais condutores e isolantes, construídos com geometria especificada para operar nas faixas de frequência de interesse, geralmente entre 300MHz e 300GHz. Esse tipo de estrutura foi apresentada inicialmente pelo engenheiro francês Georges Armand Deschamps em 1953 e passou a ser largamente estudada devido a sua versatilidade, pois podem ser produzidas facilmente com técnicas de circuito impresso e adaptam-se a qualquer tipo de superfície [7].

A antena tipo *patch* retangular é construída sobrepondo elementos metálicos em um material dielétrico de espessura muito inferior ao comprimento da onda que se propaga no espaço livre. Uma das características dessa estrutura é a direção de propagação das ondas eletromagnéticas que são normais ao plano do *patch*, ou seja, uma configuração axial broadside. O plano de terra é um elemento metálico com a função básica de reduzir a radiação dos lóbulos secundários da antena, evitando o desperdício de energia com propagação em direções indesejadas. O substrato é um material dielétrico que possui permissividade relativa situada geralmente dentro do intervalo  $2,2 \leq \epsilon_r \leq 12,0$  que assegura alta permissividade à passagem do campo elétrico [4]. A geometria básica dessa estrutura é apresentada na Figura 2.

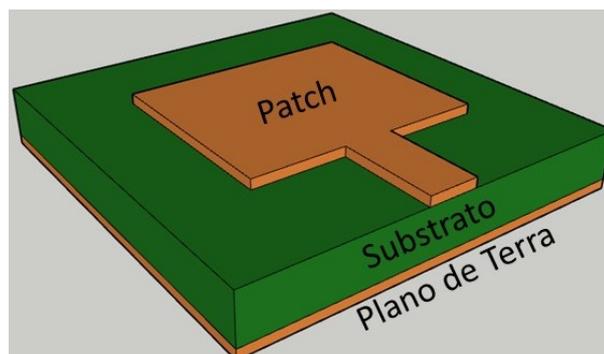


FIGURA 2. Configuração básica de uma antena de microfita (Autoria Própria).

No projeto, as dimensões do *patch* ou ressonador são críticas, podendo ser determinadas em função da frequência de operação usando modelos matemáticos aproximados que carregam erros intrínsecos ou usando métodos matemáticos de onda completa, mais complexos, que possibilitam uma análise aprofundada e maior precisão. Como qualquer antena, essa estrutura também precisa de um elemento que faça o acoplamento entre o equipamento ao qual estará ligada, seja uma fonte geradora ou uma unidade receptora de sinal, e as partes condutivas do *patch*. Esse trecho é denominado alimentador e também deve ser definido usando métodos matemáticos [4]. Entre as estruturas mais usadas para o método de alimentação estão o cabo coaxial, o acoplamento por abertura, o acoplamento por proximidade e a linha de transmissão de alta impedância. Esse último método será empregado no projeto por não desvirtuar a característica planar na antena, permitir um melhor ajuste para o casamento de impedâncias e facilitar o aspecto construtivo do protótipo.

A frequência de operação ou ressonância é ponto de partida do projeto da antena, devendo corresponder à frequência central de operação do dispositivo. A largura de banda (Band Width, BW) por sua vez é a faixa de frequências em torno da frequência de operação, em que são considerados para fins de cálculo os dois pontos onde a perda de retorno é igual a -10dB. Segundo [8], a largura de banda pode ser calculada usando a Equação 1 e classificar as antenas em termos percentuais com relação à frequência de operação em três categorias: Banda Estreita, onde  $0\% < BW < 1\%$ , Banda Larga, onde  $1\% \leq BW \leq 20\%$  e Banda Ultra Larga, onde  $BW > 20\%$ . Como já citado, a estrutura *patch* retangular opera facilmente em Banda Larga, ponto positivo para sua utilização em equipamentos de *IoT*.

$$BW\% = 2 \frac{f_{\text{superior}} - f_{\text{inferior}}}{f_{\text{superior}} + f_{\text{inferior}}} \times 100\% \quad (1)$$

A perda de retorno (RL) indica a relação entre a potência fornecida e a potência refletida na antena, representando assim um dos principais parâmetros do dispositivo, pois influenciará diretamente na eficiência deste. A matriz de espalhamento é um dos métodos mais apropriados para efetuar as medições diretas de ondas ao utilizar análise de quadripolo comuns às matrizes de impedância e admitância para linhas de transmissão [9]. A Equação 2 apresenta uma forma simplificada dos parâmetros em uma representação matricial do modelo de quadripolo análogo às matrizes de impedância e admitância das linhas de transmissão. O parâmetro  $S_{11}$  é o coeficiente de reflexão na porta 1 e possui relação direta com a perda de retorno. Assim é possível determinar a perda de retorno através da Equação 3. Quanto menor for a perda de retorno, melhor será o desempenho da antena. Valores aceitáveis de perda de retorno são os inferiores a -10dB.

$$\begin{bmatrix} b1 \\ b2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a1 \\ a2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$RL = -20 \log|S_{11}| \quad (3)$$

A Relação de Onda Estacionária (ROE), ou do inglês *Standing Wave Ratio* (SWR) é sempre um valor positivo e significa a proporção da compatibilidade entre a impedância de uma carga com a impedância de um guia de onda. Quando essa relação é 1:1, obtém-se o maior rendimento na transferência de energia, não havendo geração de ondas estacionárias ao longo do guia de onda. Dessa forma, a energia não será refletida de volta para a fonte geradora do sinal. Um valor de SWR até 2:1 é considerado aceitável para aplicações em

baixa potência. O valor do SWR pode ser medido a partir da tensão (VSWR) ou da corrente (ISWR), indicando diretamente o percentual da potência refletida entre fonte e carga que irá gerar perdas no sistema [10]. A Tabela 1 mostra alguns valores típicos de SWR e respectivas perdas.

TABELA 1. Relação entre SWR e potência refletida [10].

SWR ( x:1)	Potência refletida (%)
1:1	0
2:1	10
3:1	25
6:1	50

A densidade superficial de corrente é outro parâmetro importante no projeto da antena pois sua intensidade e distribuição implicará nas perdas por efeito joule e também influenciará tanto na distribuição dos campos quanto no coeficiente de reflexão, sendo que esse efeito é mais comum nas extremidades do *patch* devido a concentração maior dos campos [11]. Por esse motivo sua redução implica na melhoria do desempenho da antena.

### 2.3 Elementos estruturais adicionados para melhora de desempenho

Como já citado, com o intuito de otimizar o desempenho da antena, elementos estruturais são inseridos para alterar parâmetros específicos de modo a conseguir a resposta desejada. O ajuste fino desses elementos deve ocorrer para evitar prejuízos nos demais parâmetros do dispositivo, já que qualquer modificação mais substancial na estrutura pode desencadear alterações exponenciais e comprometer todo o seu funcionamento. O projeto trabalhará com três elementos estruturais: o *Slot* e a tecnologia *SIW*.

O *Slot* é um elemento que pode ser inserido em qualquer das estruturas da antena de microfita tipo *patch* retangular, a depender da resposta desejada. Um *Slot* é a remoção de material em linhas retas ou curvas com ângulos bem definidos. No acoplamento por abertura apresentado por [12], um *Slot* é usado no plano de terra que separa os substratos, e suas dimensões implicarão no casamento de impedância da linha de alimentação. Já em [13], um *Slot* de linhas cruzadas é utilizado no plano de terra para criar perturbações no percurso da distribuição superficial das correntes e assim possibilitar a ressonância da antena em duas bandas. Nesse projeto, assim como no trabalho de [14], um *Slot* será inserido no *patch* para aumentar a largura de banda.

A tecnologia de guias de onda integradas ao substrato (*substrate integrated waveguide, SIW*) configura-se como furos metalizados dispostos simetricamente que interligam as partes condutoras das faces do substrato, suprimindo as propagações de ondas de superfície, os efeitos de acoplamento mútuo dos campos próximos e reduzindo os efeitos da distribuição superficial das correntes [15]. Isso auxilia na compensação das perdas de potência, maximizando o ganho e aumentando a eficiência das antenas, principalmente para redes de sub-THz. Na Figura 3 é possível visualizar todos os elementos de aprimoramento mencionados.

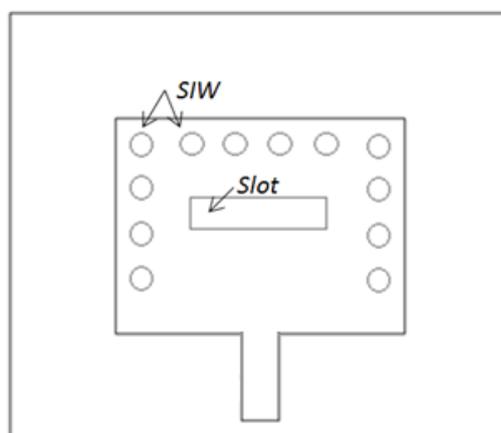


FIGURA 3. Antena *patch* retangular com inserção dos elementos *Slot* e *SIW* (Autoria Própria).

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia deu-se em três etapas. Na primeira, as dimensões do *patch* e do substrato foram levantadas por meio de uma implementação numérica computacional usando o *software* Scilab em sua versão 6.1. Na segunda, o projeto das antenas foi simulado para obtenção dos parâmetros de funcionamento usando o método dos elementos finitos disponível no *software* ANSYS HFSS® 2019. Nessa etapa foi possível verificar cada um dos parâmetros de interesse como perda de retorno, largura de banda, densidade superficial de corrente e diagramas de radiação. Após definição das características físicas da antena, iniciou-se a terceira etapa, com a confecção em circuito impresso e testes de desempenho utilizando um Analisador Vetorial de Redes – VNA.

A placa de circuito impresso utilizada como base de construção da antena contém superfícies planares de cobre em suas faces com espessura de 0,03 milímetros e um dielétrico de fibra de vidro (FR4) com espessura de 1,5 milímetros. O modelo de dispositivo proposto foi passeado na faixa de frequência ISM 2,45 GHz, apropriada para aplicações de *IoT*. Foram especificados parâmetros de entrada para o projeto como a frequência de ressonância ( $f_r$ ) de 2,45 GHz, impedância de entrada ( $Z_0$ ) de  $50\Omega$ , espessura do substrato ( $h$ ) de 1,5mm e permissividade relativa do substrato ( $\epsilon_r$ ) de 4,4. A Figura 4 trás o modelo proposto da antena.

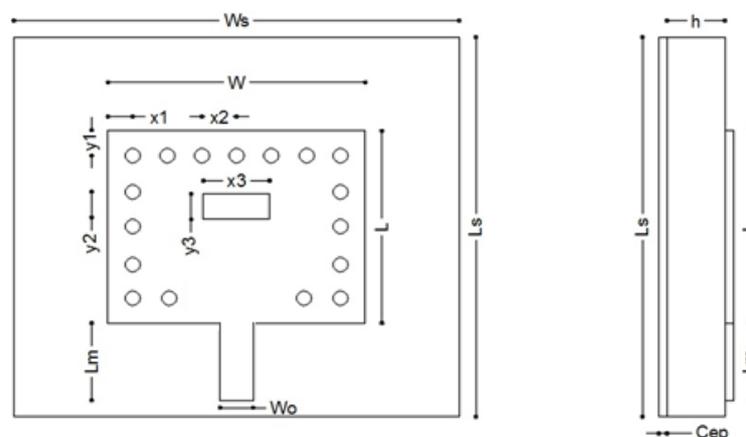


FIGURA 4. Modelo proposto da antena *patch* retangular (Autoria Própria).

Na modelagem são definidas as características das estruturas usando métodos matemáticos. Para esse projeto aplicou-se a aproximação pelo modelo da linha de transmissão, no qual a antena é representada por duas fendas separadas por uma linha de transmissão de baixa impedância  $Z_c$  e comprimento  $L$ , fornecendo uma boa percepção física e levando em consideração os efeitos de borda dos campos devido ao fato das dimensões do *patch* serem finitas [16]. Dessa forma o primeiro passo é determinar uma das dimensões do retângulo. Através da Equação 4 encontra-se a largura ( $W$ ) do *patch*. O efeito de franjamento faz com que as dimensões elétricas da antena sejam maiores do que seu tamanho físico, e como mecanismo de compensação a constante dielétrica é corrigida para um valor efetivo ( $\epsilon_{ef}$ ) usando a Equação 5. Agora já é possível determinar o comprimento corrigido ( $L$ ) do *patch* com as Equações 6 e 7 [4].

$$W = \frac{c}{2fr} \left[ \frac{2}{\epsilon_r + 1} \right]^{-1} \quad (4)$$

$$\epsilon_{ef} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[ 1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-1} \quad (5)$$

$$\Delta L = 0,412h \frac{(\epsilon_{ef} + 0,3) \left( \frac{W}{h} + 0,264 \right)}{(\epsilon_{ef} - 0,258) \left( \frac{W}{h} + 0,8 \right)} \quad (6)$$

$$L = \frac{c}{2fr\sqrt{\epsilon_{ef}}} - 2\Delta L \quad (7)$$

Nas equações acima  $f_r$  é a frequência de ressonância da antena,  $C$  é a velocidade das ondas eletromagnéticas no espaço livre,  $\epsilon_r$  é a permissividade relativa do substrato,  $\epsilon_{ef}$  é a permissividade efetiva,  $\Delta L$  é a variação de comprimento da antena e  $h$  é a espessura do substrato.

Definidas as dimensões do *patch*, devem-se buscar as dimensões do alimentador. Segundo [17], o comprimento ( $L_m$ ) desse alimentador não deve ser maior que 25% do comprimento da onda na frequência de ressonância, podendo ser calculada com a Equação 8. Já a largura ( $W_0$ ) do alimentador é calculada resolvendo a Equação 9 com métodos numéricos iterativos como o da bisseção [4].

$$L_o = \frac{c}{4f_r\sqrt{\epsilon_{ef}}} \quad (8)$$

$$Z_o = \begin{cases} \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{ef}} \left[ \frac{W_o}{h} + 1,393 + 0,667 \ln \left( \frac{W_o}{h} + 1,444 \right) \right]}, & \text{para } \frac{W_o}{h} > 1 \\ \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{ef}}} \ln \left( \frac{8h}{W_o} + \frac{W_o}{4h} \right), & \text{para } \frac{W_o}{h} \leq 1 \end{cases} \quad (9)$$

As dimensões do substrato não são variáveis críticas do dispositivo, mas devem ser maiores em relação ao *patch*, de forma a garantir área suficiente no plano de terra para reduzir os lóbulos secundários e evitar a irradiação em direções indesejadas. Assim, o comprimento ( $L_s$ ) foi calculado usando a Equação 10 e a largura ( $W_s$ ) por meio da Equação 11.

$$L_s = L + 8h \quad (10)$$

$$W_s = W + 6h \quad (11)$$

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nessa seção serão apresentados e analisados os principais resultados referentes às simulações e testes experimentais, buscando uma comparação entre valores teóricos e práticos. Os modelos 3D projetados para a antena de referência e para a antena com a inserção dos elementos *Slot* e *SIW* podem ser visualizados na Figura 5.

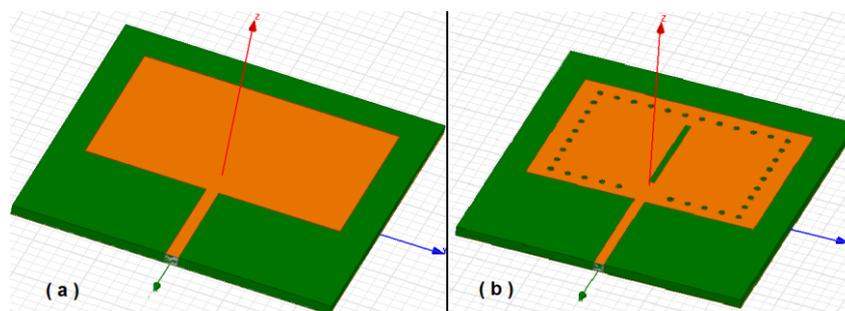
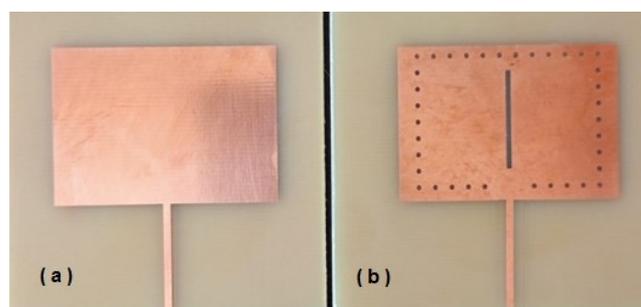


FIGURA 5. Antena de referência (a) Antena com *Slot* e *SIW* (b) projetadas no HFSS® (Autoria Própria).

Partindo da modelagem matemática executada no Scilab, os valores das dimensões das antenas foram aplicados no projeto do ANSYS HFSS® e sofreram alguns pequenos ajustes para sintonizar a resposta na frequência de interesse. A modelagem não incluía as dimensões e posições dos guias de onda integrados no substrato (*SIW*) e nem do *Slot* inseridos no *patch*. Esses valores foram ajustados mediante sucessivas simulações na busca pela otimização da resposta em relação à antena de referência. A Tabela 2 trás as dimensões finais das antenas propostas. A Figura 6 mostra o protótipo das duas antenas que foram submetidos aos testes com o VNA.

TABELA 2. Dimensões das antenas *patch* retangular.

Parâmetros	Ref.(mm)	<i>Slot</i> e <i>SIW</i> (mm)
$W$	40,0	40,0
$L$	27,3	27,3
$W_o$	1,0	1,0
$L_m$	20,0	20,0
$d$	-	1,0
$L_S$	56,0	56,0
$W_S$	50,0	50,0
$X_1$	-	3,5
$X_2$	-	3,0
$X_3$	-	1,0
$Y_1$	-	1,6
$Y_2$	-	3,0
$Y_3$	-	18,0

FIGURA 6. Protótipos das antenas de referência (a) e com *Slot* e *SIW* (b) (Autoria Própria).

#### 4.1. Perda de Retorno

De posse dos dados de perda de retorno é possível confrontar as simulações e os experimentos. O intervalo de amostragem escolhido ficou compreendido entre 1,8GHz a 2,8GHz, faixa reduzida e próxima da frequência de ressonância, pois uma faixa maior não apresentava dados significativos. Na Figura 7, pode-se observar que a influência da inserção do *Slot* e da tecnologia *SIW* aparece de forma similar, tanto na simulação quanto no experimento, melhorando visivelmente o parâmetro da perda de retorno. O protótipo com os elementos *Slot* e *SIW* mostrou um desempenho melhor que a simulação, com uma perda de retorno de aproximadamente -20dB em uma largura de banda superior a 100MHz.

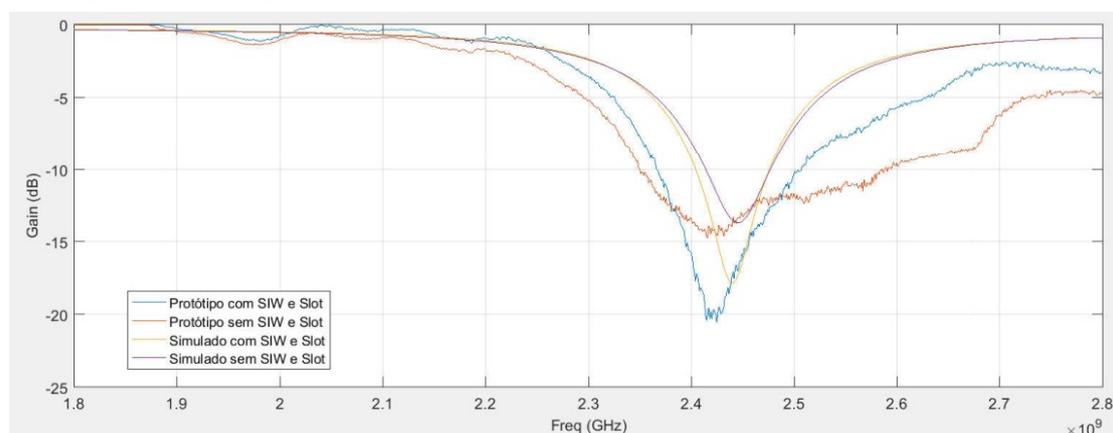


FIGURA 7. Gráficos de perda de retorno simuladas e experimentais (Autoria Própria).

#### 4.2. Diagramas de Radiação

Os diagramas de radiação de campo elétrico em 2D, 3D e a distribuição superficial de correntes foram obtidos apenas na simulação, comparando a antena de referência com a aprimorada. Os elementos inseridos melhoram o desempenho da antena, concentrando uma maior quantidade de energia na direção de interesse da irradiação, apesar de também terem aumentado um pouco os lóbulos secundários. Nas Figuras 8 e 9 é possível visualizar a comparação dos diagramas de radiação 2D e 3D respectivamente. Na Figura 10 observa-se a distribuição superficial de corrente, mostrando a efetividade da redução com a inserção dos elementos *SIW* e *Slot*.

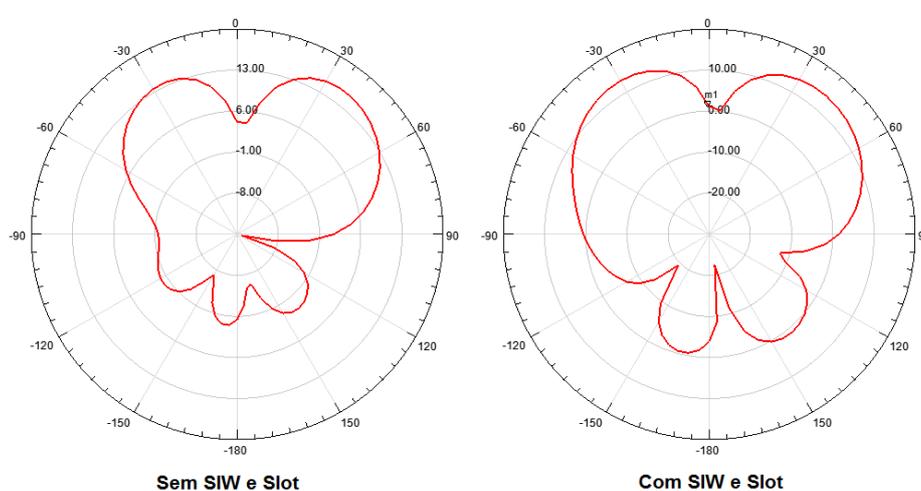


FIGURA 8. Diagrama de radiação 2D simulado no HFSS® (Autoria Própria).

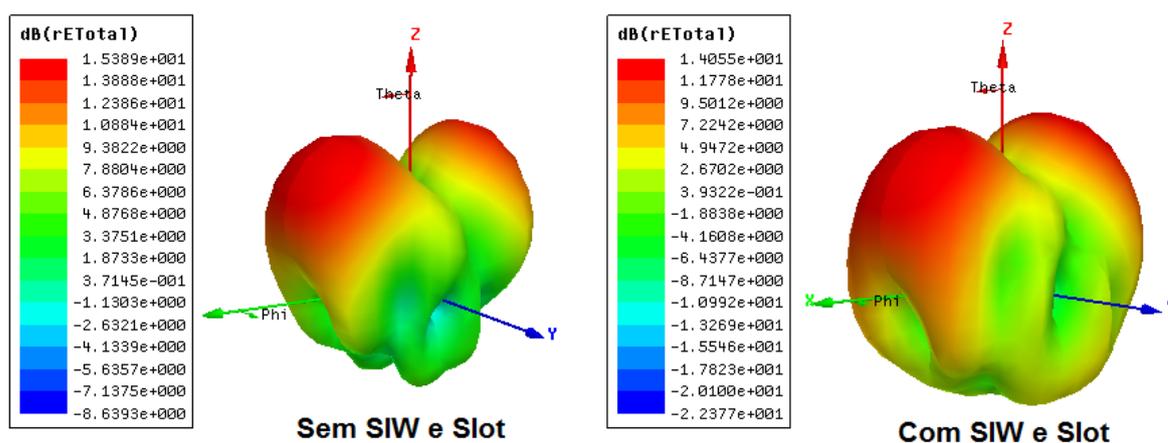


FIGURA 9. Diagrama de radiação 3D simulado no HFSS® (Autoria Própria).

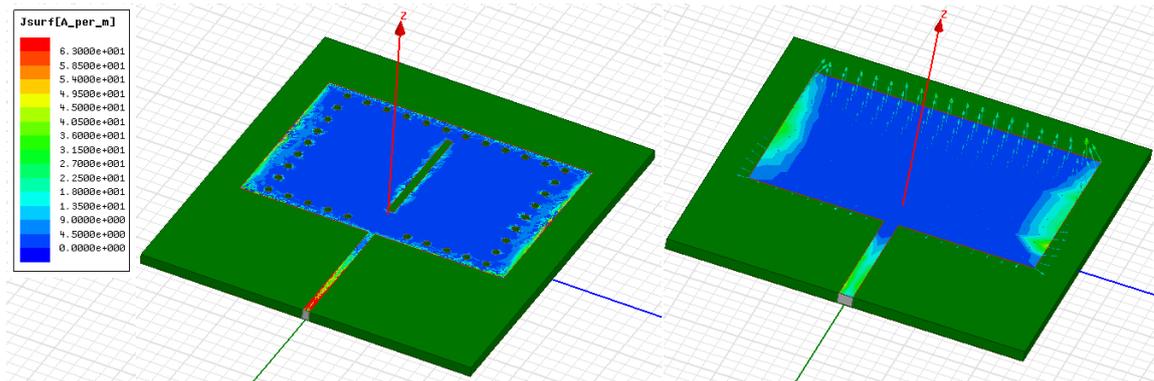


FIGURA 10. Simulação da distribuição superficial de corrente no HFSS® (Autoria Própria).

#### 4.3. Impedância e SWR

A impedância e a SWR possuem uma relação como já citado. Se a impedância da antena for igual à da linha de transmissão, diz-se que o casamento é perfeito e não haverá formação de ondas estacionárias, assim o valor de SWR terá uma relação 1:1. A análise dos dados mostrou que a inserção dos elementos *Slot* e *SIW* melhorou o casamento de impedância. As Figuras 10, 11 e 12 trazem a comparação entre as antenas experimentais. Apesar dos valores experimentais serem muito próximos nos dois gráficos, é possível visualizar as diferenças. Na Figura 10, o comportamento da impedância destacado em verde está mais próximo dos  $50\Omega$  que é a impedância característica da linha. Na Figura 11, ao observar o comportamento dos dados simulados e experimentais para as duas antenas, percebe-se um valor menor ou mais próximo de 1 para a antena que utiliza os elementos *SIW* e *Slot*, ficando claro inclusive que os dados experimentais mostram um desempenho melhor que na simulação. Já na Figura 12 tem-se a carta de Smith comparando os valores simulados com os experimentais do protótipo com os elementos *SIW* e *Slot*, onde também percebe-se um desempenho ainda melhor do protótipo, com um valor real mais próximo dos  $50\Omega$  da linha.

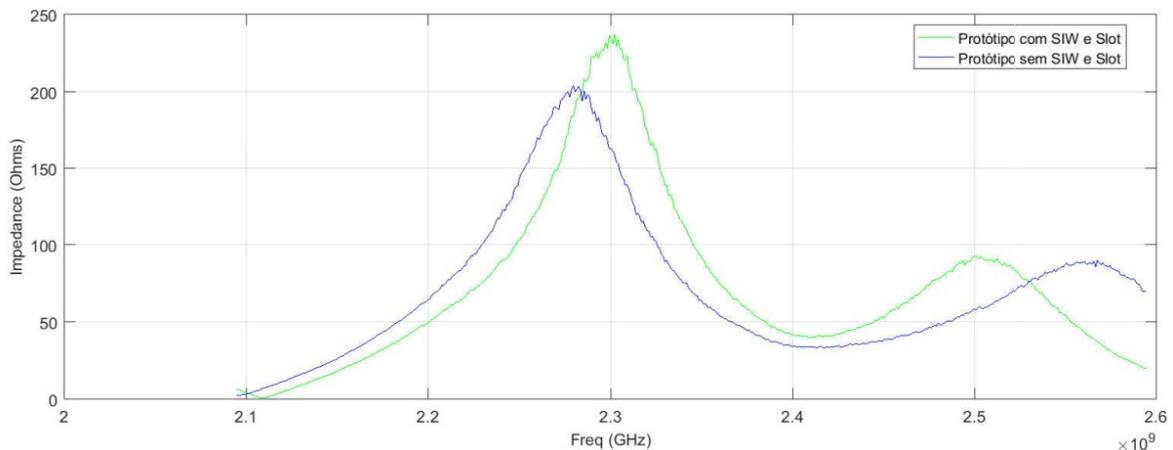


FIGURA 10. Impedâncias de entrada das antenas experimentais (Autoria Própria).

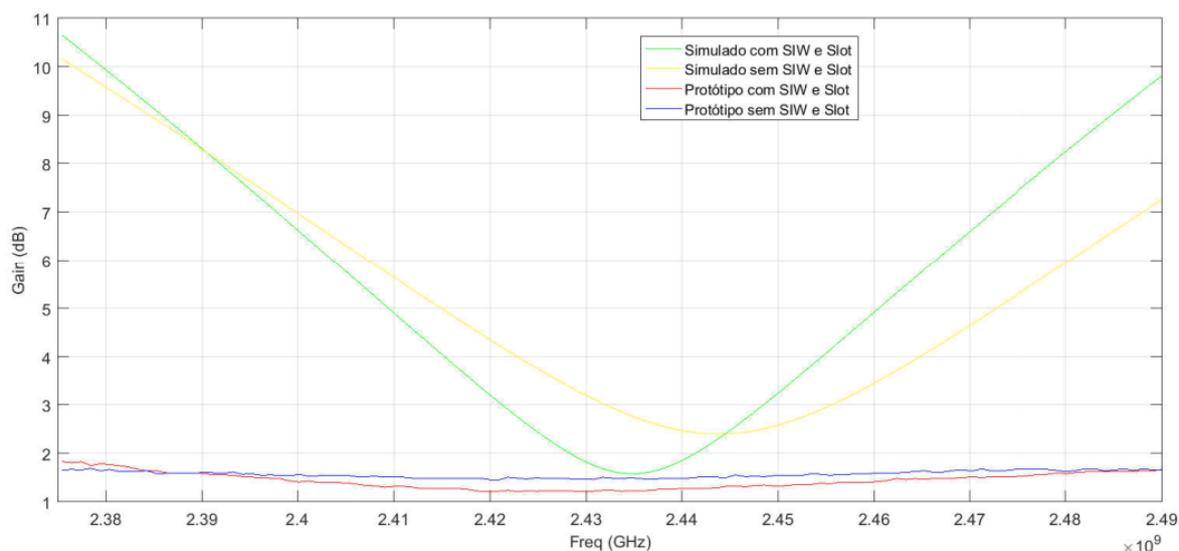


FIGURA 11. VSWR das antenas experimentais (Autoria Própria).

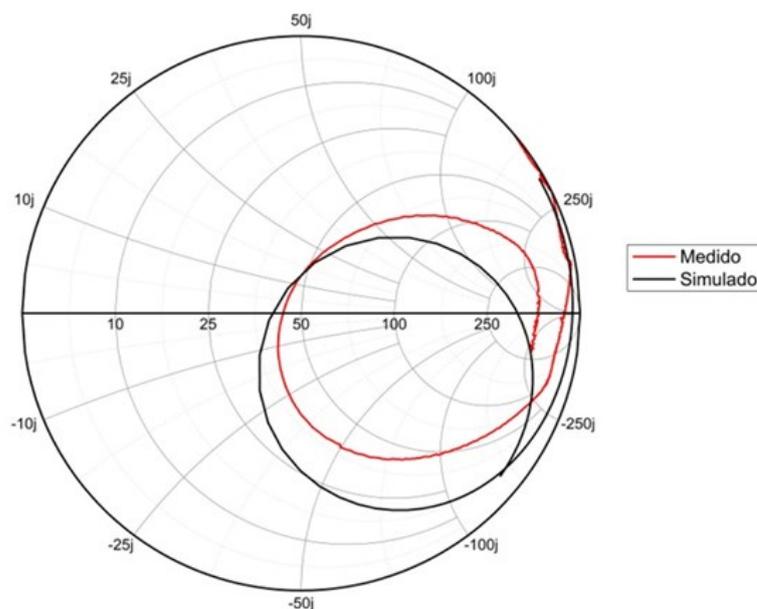


FIGURA 12. Carta de Smith das antenas experimentais (Autoria Própria).

## 5. CONCLUSÃO

Através desse projeto foi possível apresentar a construção e comparação de antenas tipo *patch* retangular, mostrando a influência eficiente da aplicação do elemento *Slot* e da tecnologia *SIW* para aperfeiçoamento do dispositivo, reduzindo os efeitos de franjamento, a propagação das ondas de superfície e densidade de corrente superficial. Isso pode ser percebido na melhoria dos parâmetros como impedância de entrada, perda de retorno, relação de ondas estacionárias e diagramas de reflexão, quando comparadas a antena de referência e a antena com a inserção dos elementos. Tanto nas simulações quanto nos experimentos, os dispositivos apresentaram perda de retorno inferior a -10dB para frequências próximas da ressonância e largura de banda superior a 80MHz. Esse conjunto de informações implica que os dispositivos projetados são aplicáveis no desenvolvimento de soluções de *IoT* para a faixa de frequência ISM 2.45GHz.

Na produção e testes dos protótipos, ficou claro que apesar dos modelos matemáticos serem aproximados, as variações percebidas entre simulação e experimento não inviabilizaria a utilização dos dispositivos,

mostrando a eficiência da modelagem e a importância da junção teoria e prática para a convergência de resultados da pesquisa. Esse material terá utilidade para estudos posteriores com antenas do tipo *patch* retangular, onde podem-se verificar a resposta da variação da geometria do *Slot* inserido no *patch* ou mesmo posição e diâmetro dos furos da tecnologia *SIW* ao longo do *patch* e no substrato.

## 6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES, CNPq, UFRSA, GEPEAT e à equipe do Laboratório de Micro-ondas da UFRSA. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

## REFERÊNCIAS

- [1] ANATEL; Resolução N° 680 de 27 de junho de 2017. Disponível online: <https://informacoes.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/2017/936-resolucao-680> (acesso em 18/12/2022).
- [2] Santos, Bruno P.; Silva, Lucas A. M.; Celes, Clayson, S. F. S.; Neto, João B. B.; Vieira, Marcos A. M.; Vieira, Luiz F. M.; Goussevskaia, Olga N.; Loureiro, Antonio A. F. (2016). Internet das Coisas: da Teoria à Prática. Disponível online: <https://homepages.dcc.ufmg.br/~mmvieira/cc/papers/internet-das-coisas.pdf> (acesso em 18/12/2022).
- [3] Souza, Paulo H. M.; Junior, Silvio J. C.; Neto, Geraldo G. D. Indústria 4.0: Contribuições para Setor Produtivo Moderno. XXXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Joinville, SC, Brasil, 10 a 13 de outubro de 2017.
- [4] Balanis, C. A.; *Antenna Theory: Analysis and Design*, 3° ed.; New Jersey: Wiley-interscience, EUA, 2005; p. 1 – 1047.
- [5] Galegale, Gustavo P.; Siqueira, Erica; Silva, Carolina B. H.; Souza, Cesar A. The Internet of Things Applied to Business: A Bibliometric Study. JISTEM - Journal of Information Systems and Technology Management. N° 3, Vol. 13, Brazil, Sep/Dez, 2016, pp. 423-438.
- [6] Santos, Marcos; Manhães, Aline M.; Lima, Angélica R. Indústria 4.0: Desafios e Oportunidades para o Brasil. Anais do X Simpósio de Engenharia de Produção de Sergipe, São Cristóvão, SE, Brasil, 22 a 24 de novembro de 2018.
- [7] Silva, Iggor B. da. Estudo de antenas monopolo impresso de formato F para aplicação em *wireless* 5G com MIMO massivo. Dissertação, Universidade Federal Rural do Semi-árido, Mossoró, 2019.
- [8] Filho, Valdez A. A. Arranjos Log-Periódicos Compactos em Microfita com Elementos Fractais de Koch. Dissertação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.
- [9] Holanda, Samanta M. de. Estudo e Desenvolvimento de Antenas de Microfita Utilizando Tecido de Malha a Base de Fibras Têxteis Compostas. Dissertação, Universidade Federal Rural do Semi-árido, Mossoró, 2016.
- [10] Fmuser. Voltage Standing Wave Ratio. Disponível online: <https://pt.fmuser.org/news/fm-transmitter/What-is-the-Voltage-Standing-Wave-Ratio-VSWR/> (acesso em 21/12/2022).
- [11] Andrade, Betoven O. de. Estudo de Arranjos de Antena de Microfita com Patch Quase-fractal para Comunicação sem Fio. Dissertação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.
- [12] Moraes, José H. C. de. Estudo de Antenas Patches de Microfita Miniaturizadas em Banda Larga para Aplicação em Dispositivos Móveis e Portáteis. Dissertação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011.
- [13] Sze, J. Y.; Chang, W. Dual band Square Slot Antenna with Embedded Crossed Strips for Wireless Local Area Network Applications. Microwave and Optical Technology Letters, Vol. 51, no. 2, pp. 435-439, Feb., 2009.
- [14] Zhu, J.; Eleftheriades, G. Dual-band metamaterial-inspired small monopole antenna for WiFi applications. Electronics Letters, Vol. 45, no. 22, Oct. 2009.
- [15] Alibakhshikenari, M.; Virdee, B. S.; Salekzamankhani, S.; Aïssa, S.; See, C. H.; Soin, N.; Fishlock, Sam j.; Althuwayb, Ayman A.; Alhameed, Raed A.; Huynen, Isabelle; McLaughlin, James A.; Falcone, Francisco. (2021). High-isolation antenna array using SIW and realized with a graphene layer for sub-terahertz wireless applications. Scientific Reports, 11(1), 1-14.
- [16] Silva, Isaac B. T. da. Projeto e Análise de Antena de Microfita com Utilização de Metamaterial do Tipo CSRR. Dissertação, Universidade Federal Rural do Semi-árido, Mossoró, 2014.
- [17] Pozar, David M. *Microwave Engineering*. 4 ed. United States of America: John Wiley & Sons. p. 756. 2012.