

ANTENA PCB ESPIRAL VESTÍVEL PARA NB-IOT

Data de aceite: 02/10/2023

Paulo Fernandes da Silva Júnior

Universidade Estadual do Maranhã
São Luís, Maranhão
<https://orcid.org/0000-0001-6088-6446>

Luys Arthur Serejo Alves

Universidade Estadual do Maranhão -
UEMA
São Luís, Maranhão
<https://orcid.org/0009-0009-9704-8257>

Ewaldo Eder Carvalho Santana

Universidade Estadual do Maranhão -
UEMA
São Luís, Maranhão
<https://orcid.org/0000-0002-8894-5353>

Paulo Henrique Bezerra Carvalho

Universidade Federal do Maranhão -
UFMA
São Luís, Maranhão
<https://orcid.org/0009-0006-9576-4469>

Eduarda Fróes

Universidade Federal de Campina Grande
- UFCG
Campina Grande, Paraíba
<https://orcid.org/0000-0003-2301-9452>

Raimundo Carlos Silvério Freire

Universidade Federal de Campina Grande
- UFCG
Campina Grande, Paraíba
<https://orcid.org/0000-0002-5395-7143>

RESUMO: A Internet das Coisas propõe a conectividade de dispositivos domésticos, médicos e industriais por meio de soluções sem fio, e em diversas aplicações, como tecnologia vestível e estruturas flexíveis e resistentes. As antenas são dispositivos utilizados na fronteira dos sistemas de telecomunicações sem fio. Neste trabalho é desenvolvida uma antena de placa de circuito impresso espiral vestível flexível, aplicada à Internet das Coisas de banda estreita, operando na banda de 880 MHz, e construída em dielétrico flexível, laminado de poliamida. A partir dos resultados observou-se que a antena espiral obteve um padrão de radiação omnidirecional, com largura de banda de 10 MHz, e ganho de 5,5 dBi.

PALAVRAS-CHAVE: Antenas espiral flexível, Internet das Coisas, Poliamida, placa de circuito impresso.

1 | INTRODUÇÃO

Diversos avanços nas telecomunicações têm possibilitado as conexões em tempo real de eventos esportivos, vídeo games, conversas instantâneas, o uso estendido das redes

sem fio para diversos dispositivos e as aplicações em internet das coisas (*Internet of Things* – IoT). Estes avanços são fruto de diversas melhorias e implementações de novas estruturas, dentre elas podem ser citadas duas frentes de trabalho: as pesquisas com protocolos e padrões mais robustos, como a rede de sem fio junto ao corpo (*Wireless Body Area Network* – WBAN) que tem se intensificado com uso em aplicações médicas e não médicas [1], [2], incluindo normas específicas para o uso da tecnologia, como o IEEE 802.15.6-2012 [3]; e o desenvolvimento de componentes menores e mais versáteis, dos quais as antenas são parte importante.

A WBAN pode ser compreendida como uma rede de sensores para fins especiais, concebidos para funcionar de forma autônoma conectando vários sensores e dispositivos localizados no interior e exterior do corpo humano. Para o uso desta tecnologia os dispositivos necessitam ser de fácil interação com o corpo, flexíveis, de baixo impacto visual e preferencialmente de baixo custo, tornando matérias como a poliamida [4] um material ideal para confecção dessas antenas.

Diversos trabalhos procuraram desenvolver antenas para uso junto ao corpo em tecnologias como de banda ultralarga (*Ultra Wideband* - UWB), redes locais sem fio (*Wireless Local Area Network* - WLAN), entre outras faixas de frequências, com uso preferencial das geometrias euclidianas, como as circulares, quadriláteros, triangulares e outros, em de microfita, tipo patch e monopolo impresso [5], [6]. Uma das características das antenas de microfita é a relação entre o seu perímetro e a frequência de ressonância. Como a corrente de superfícies das antenas de microfita estão mais concentradas na borda do no centro, a frequência de ressonância é indicada pela distância percorrida pela corrente. Assim, antenas com frequência mais baixas exigem perímetros maiores tornando necessário uso de outros tipos de geometrias, a exemplo da geometria espiral [7].

As antenas patch espirais de microfita podem assumir diferentes formas geométricas, podem ser feitas com material de baixo custo, permitem o projeto com dimensões reduzidas e são utilizadas em diversas aplicações [8], [9]. Quando comparadas com outras antenas comerciais na mesma faixa de frequência operacional, como antenas telescópicas, Yagi-Uda ou helicoidais, as antenas microstrip em espiral têm a vantagem de minimizar os erros sistemáticos da medição. Além disso, eles melhoram a reprodutibilidade do experimento e têm o tamanho da mesma ordem de dispositivo a ser interrogado em um sistema de sensoriamento remoto passivo [10].

Antena em placa de circuito impressos (*Printed Circuit Board* – PCB) são antenas projetadas para placa de circuito, estando no mesmo plano, e são utilizadas em diversos dispositivos, como os dispositivos de comunicações móveis, tablets, relógios inteligentes, pulseiras inteligentes, eletrodomésticos com conexão sem fio. As PCB antenas são do tipo de antena de microfita, e diversos tipos de antenas são utilizadas nas aplicações, como as antenas F invertido, L invertido, espirais e outras [11-12]. O casamento de impedância pode ser realizado por dispositivos discretos, como capacitores e indutores do tipo montado

na superfície (*Surface Mounted Device* – SMD) Um exemplo de antena PCB pode ser observado em um ESP32, Figura 2.



Figura 2. Antena PCB do Esp32.

Fonte: Autor (2023)

A Internet das Coisas (*Internet of Things* – IoT) está relacionada interconexão em rede e equipados, os quais pode ser conectas com o sem fio, com interoperabilidade entre diversos tipos de sistemas e dispositivos. A IoT pode ser compreendida como uma plataforma para que os dispositivos se comuniquem eletronicamente e compartilhem informações e dados específicos com o mundo ao seu redor. Assim, a IoT pode ser vista como uma evolução real do que conhecemos como Internet ao agregar uma interconectividade mais ampla, uma melhor percepção da informação e serviços inteligentes mais abrangentes, utilizando os protocolos da Internet, e aplicações com conexão máquina para máquina (*Machine-to-Machine Communications* – M2M) [13].

A Internet das Coisas pode ser realizada em três paradigmas [14]: Middleware, orientado para conexões; Sensores, orientado para as coisas; Conhecimento, orientado para a semântica. O operação com IoT tem natureza interdisciplinar, assim, a utilidade da IoT pode ser desencadeada em um domínio de aplicação onde os três paradigmas se cruzam.

O 3GPP introduziu um novo padrão de tecnologia celular chamado Internet das coisas de banda estreita (*Narrowband* – NB) para fornecer serviços de IoT por meio de redes celulares de área ampla. O NB-IoT é baseado em *Long-Term Evolution* (LTE) e, portanto, opera no espectro licenciado, projetado para levar em consideração a maioria dos requisitos de serviço de IoT, incluindo cobertura interna, suporte a um maior número de dispositivos conectados, baixo custo de conectividade, baixo consumo de energia e arquitetura de rede otimizada. Ao contrário de outras tecnologias IoT não licenciadas que exigem a implantação de novas infraestruturas, o NB-IoT permite uma fácil instalação de rede IoT com custo reduzido porque reutiliza o LTE existente infraestruturas [15].

NB-IoT herda do LTE a maioria de seus recursos, bem como seus canais e sinais essenciais [16]. No entanto, a complexidade desses canais e sinais foi reduzida para

respeitar as restrições de baixo custo e baixa potência dos módulos de equipamentos do usuário NB-IoT. Os números de canais e sinais foram reduzidos e adaptados para se adequarem à nova estrutura do quadro NB-IoT [17]. O sistema foi projetado para ocupar uma banda de frequência de 180 kHz (correspondente a um bloco de recursos no sistema LTE) e para lidar com um alto número de repetições para alcançar transmissões de longo alcance e penetração interna profunda [17].

Neste trabalho é desenvolvida uma antena PCB espiral vestível flexível, construídas em poliamida, para NB-IoT, operando na faixa de 880 MHz, com largura de banda de 10 MHz. Este trabalho está dividido em mais três partes além desta Introdução. Na seção 2 são apresentados os materiais e métodos utilizados no desenvolvimento do trabalho. Na seção 3 são abordados os principais conceitos sobre a tecnologia de antenas. Na seção 4 são apresentados os Resultados e Discussões do trabalho e as Considerações Finais na seção 5.

2 | MATERIAIS E MÉTODOS

Os circuitos impressos flexíveis e placas de circuito impresso podem permitir que uma ampla variedade de dispositivos sem fio operem em frequências diferentes sem antenas múltiplas, podendo incluir dispositivos de baixo perfil e miniaturizadas, com largura de banda largura de banda aprimorada, tamanho reduzido, excelente eficiência e uma zona de exclusão menor. O funcionamento de uma antena, como a frequência de ressonância, largura de banda, ganho e o diagrama de irradiação, é afetado diretamente pelos materiais e a geometria utilizada em sua construção.

As antenas flexíveis dependem de requisitos como estrutura plana, materiais condutores flexíveis e substrato dielétrico flexível. Além destes fatores, características como a permissividade e espessura do substrato dielétrico são cruciais para determinar a largura de banda e a eficiência da antena. As aplicações estendem-se ao monitoramento de pessoas em saúde, desenvolvimento de atletas, proteção e segurança de pessoas em locais com risco de vida de altas temperaturas como bombeiros, operadores de caldeiras e trabalhadores de usinas de minério. Uma proposta para este tipo de antenas e a sua construção em materiais que podem ser embutidos nas roupas ou acessórios utilizados junto ao corpo dos usuários [18].

De acordo com uma metodologia para o desenvolvimento de antenas para uso junto ao corpo requer: a escolha do material dielétrico; caracterização das propriedades dielétricas; determinação da forma e tipo de antena a ser utilizada; fabricação de um protótipo; medições e análise dos resultados [19-20].

Nessa fase do projeto foram realizados testes para uso de dielétrico flexível que podem ser usando junto ao corpo, a poliamida. A poliamida é um material dielétrico flexível, resistente a tensões mecânicas e temperatura de operação acima de 225°, com aplicações

em circuitos flexíveis comerciais, realizando a caracterização dielétrica do material por meio do processo de sonda.

Nesse trabalho é projetado, simulado e desenvolvido uma antena espiral flexível em placa de circuito impresso com a forma da letra P. Os passos para a execução do projeto são:

- Definição da tecnologia para a aplicação;
- Definição de largura de banda e frequências desejadas;
- Avaliação das dimensões aceitáveis para o circuito no qual a antena será inserida;
- Escolha do material dielétrico a ser utilizado e a caracterização dielétrica do material;
- Definição da forma, considerando a aplicação escolhida, do elemento irradiante;

A antena foi simulada no programa comercial ANSYS usando a poliamida, com largura espessura de 0,05 mm, constante dielétrica relativa $\epsilon_r = 4$, tangente de perda de 0,04, impedância de 50Ω na linha de transmissão. A poliamida é um material dielétrico flexível, resistente a tensões mecânicas e temperatura, podendo operar em temperaturas acima de $225 \text{ }^\circ\text{C}$ [21], com aplicações em circuitos flexíveis comerciais, realizando a caracterização dielétrica do material por meio do processo de sonda. O Protótipo foi construída pelo processo de derretimento por percloreto de ferro.

Na Figura 1 podem ser observados a antena PCB espiral flexível com a forma da letra, simulada com as cotas em mm e o protótipo construído, com uma área total de $5,5 \text{ cm}^2$.

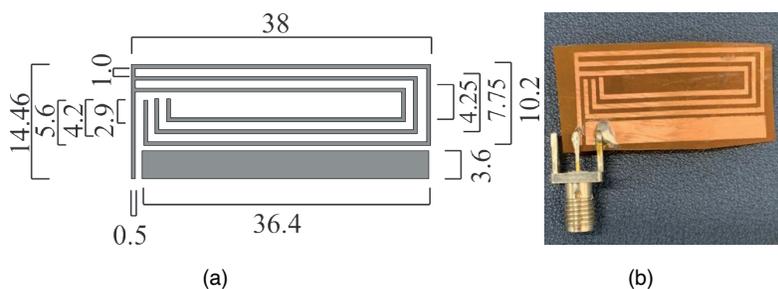


Figura 1. Antena PCB espiral flexível na forma da letra P: a) Simulada com as cotas em mm; b) Protótipo.

Fonte: Autor (2023)

O protótipo é medido no Analisador de Redes Vetorial (*Vectorial Network Analyzer* – VNA), LibreVNA 100 KHz a 6 GHz, no laboratório de eletromagnetismo aplicado, na Universidade Estadual do Maranhão. As configurações de medição da antena, com as conexões e visualização do resultado medido, podem ser observadas na Figura 2.

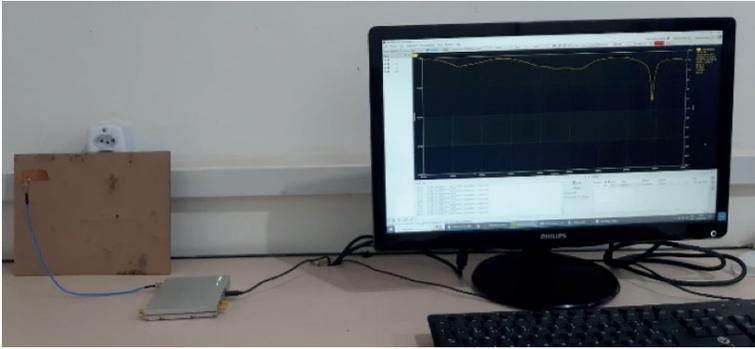


Figura 2. Configuração de medição do protótipo da antena PCB espiral flexível para NB-IoT.

Fonte: Autor (2023)

3 | TECNOLOGIA DE ANTENAS

A conectividade em tempo real de pessoas e sistemas espalhados em quase todo mundo, têm incentivado as pesquisas para otimização dos sistemas de telecomunicações. As tecnologias de antenas como parte integrante deste sistema, têm recebido contribuições importantes, quanto as possíveis geometrias, materiais, componentes, sistemas de controle, entre outros aspectos a serem utilizados no desenvolvimento de antenas. Segundo [8] antenas são dispositivos utilizados em sistemas de comunicação sem fio, que tem como objetivo transformar ondas guiadas em ondas radiais, podendo ser de três tipos:

Antenas filamentosas, formadas por um fio, que pode assumir diversas formas: reta, quadrática, triangular, circular, helicoidal, encontradas em automóveis, prédios, aviões, naves espaciais, rádios, roteadores, etc.

Antenas de abertura, formadas por tubos com geometria quadra, circular, retangular, entre outras, com aplicações espaciais e aeronáuticas; e

Antenas de microfita, que tiveram uso popularizado a partir da década de 1970, que consistem de um elemento irradiante (*patch*) e um plano de terra metálico separados por um substrato dielétrico, tanto o elemento *patch*, quanto o plano de terra podem assumir geometrias diversificadas. As antenas de microfita possuem apresentação discreta, de fácil fabricação, moldáveis a superfícies planas ou curvas e de baixo custo, compatíveis com projetos de circuitos monolíticos integrados de micro-ondas (*Microwave Monolithic Integrated Circuits – MMIC*), sendo versáteis quanto a frequência de ressonância, polarização, diagrama de irradiação e impedância. Possuem aplicações em satélites, radar, biomedicina, mísseis, dispositivos móveis, roteadores, e muitos outros.

As antenas utilizadas nos sistemas de telecomunicações apresentam dimensões e faixas de aplicações diversas. As antenas para transmissão de sinal de rádio AM (*Amplitude Modulation – Modulação por Amplitude*), por exemplo, podem chegar a dezenas de metros, enquanto que as antenas ópticas possuem dimensões em escala nanométrica. As antenas

ópticas ou nanoantenas, geralmente operam nas faixas de frequências da luz visível, com comprimento de onda entre 400 – 700 nm, ou seja, em frequências nas faixas de Terahertz. Uma das linhas de pesquisa em nanoantenas é a possibilidade do uso de materiais plasmônicos, para o desenvolvimento de biosensores com aplicações em foto-deteção, espectrografia e transferência de calor [22-23]. Segundo [8] a descrição do desempenho de uma antena é dada pela definição de seus parâmetros fundamentais.

3.1 Parâmetros Fundamentais

Os parâmetros fundamentais indicam as principais características observadas em uma antena. Dentre outros podem ser destacados o diagrama de irradiação, a diretividade, ganho, largura de banda e a polarização. A seguir são apresentados os conceitos de cada parâmetro.

3.1.1 Diagrama de Irradiação

O diagrama de irradiação ou diagrama de uma antena é uma função ou gráfico que descreve as propriedades direcionais de uma antena, podendo descrever o campo elétrico ou magnético, geralmente, no campo distante [24]. A região de campo distante, ou região de Fraunhofer, “é definida como a região de campo de uma antena onde a distribuição angular dos campos *independente da distância da antena*”, tendo a antena uma dimensão D , a região de campo distante pode ser estabelecida para distâncias superiores a $2D^2/\lambda_0$, em que λ_0 é o comprimento de onda ($\lambda_0 = c/f_r - c$ é velocidade da luz no vácuo aproximadamente $3 \cdot 10^8$ e f_r é a frequência de ressonância da antena). “*As propriedades de irradiação incluem densidade de fluxo de potência, intensidade de irradiação, intensidade de campo, diretividade, fase ou polarização*” [8].

O diagrama da antena pode ser visualizado em diagramas em duas dimensões, utilizando coordenadas polares, e em três dimensões, com coordenadas esféricas, em que é representada a magnitude do campo elétrico e magnético como uma função do espaço angular em três escalas: na escala linear, chamado de diagrama de campo; o diagrama de potência representa o quadrado da magnitude do campo elétrico ou magnético; e em escala logarítmica, em que o diagrama de potência é apresentado em decibéis (dB), plotado a uma distância constante ou a um raio (r) [8]. O diagrama de potência em coordenadas esféricas, de raio, r , e de ângulo θ e φ é definido por:

$$P(\theta, \varphi) = P_r(r, \theta, \varphi)r^2 = \text{densidade de potência por unidade de ângulo sólido (W/m}^2\text{)}. \quad (1)$$

A densidade de potência é a componente radial do vetor de *Poynting*, dado em,

$$P_r(r, \theta, \varphi) = \frac{1}{2} \mathbf{Re}[\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*] = \frac{1}{2\eta_0} |\mathbf{E}|^2, \quad (2)$$

em que \mathbf{E} é a intensidade de campo elétrico (V/m), \mathbf{H} é a intensidade de campo

magnético (A/m), transversal a direção de propagação da onda na direção radial (r) e $\eta_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0}$ é a impedância da onda no espaço livre, em que μ_0 e ϵ_0 são a permeabilidade e a permissividade do espaço livre [25]. Geralmente o diagrama de potência é normalizado para uma potência máxima de valor $P_{m\acute{a}x}$ conforme,

$$P_n(\theta, \varphi) = \frac{P_n(\theta, \varphi)}{P_{m\acute{a}x}}. \quad (3)$$

Na Figura 3 é apresentado um exemplo de um diagrama de irradiação tridimensional em dB, com a indicação da largura de feixe de meia potência (*Half-Power Beamwidth* – HPBW), ou seja, em -3 dB do valor máximo, lóbulo maior, lóbulos menores, lóbulos laterais e regiões de nulo, com os sinais de mais (+) e menos (-) indicando a polarização relativa da amplitude entre os vários lóbulos. Pela observação do diagrama de potência é possível identificar a relação frente/costas (*Front-to-Back* – F/B) da antena, esta relação indica a medida de isolamento promovida por uma antena direcional para a fonte na direção oposta à direção de máximo ganho $\theta_{m\acute{a}x}$, expresso em dB. Na Figura 3 é apresenta a operação logarítmica da relação frente/costas, ou seja, a relação entre a maior potência irradiada no lóbulo principal e a maior potência (P_n) do lóbulo das costas.

$$\frac{F}{B} = 10 \log_{10} \frac{P_n(\theta_{m\acute{a}x}, \varphi)}{P_n(\theta_{m\acute{a}x} \pm \pi, \varphi)} = -10 \log_{10} P_n(\theta_{m\acute{a}x} \pm \pi, \varphi) \quad (4)$$

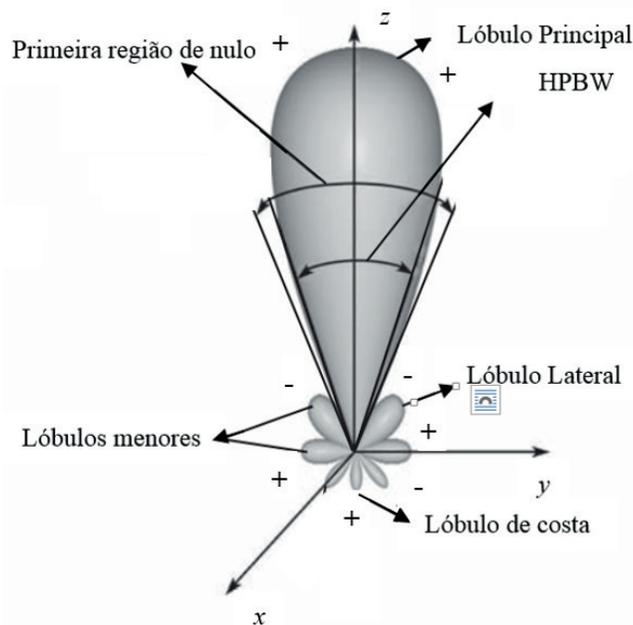


Figura 3. Exemplo do diagrama de irradiação [8].

Fonte: Adaptado de Balanis [8].

A Figura 4 apresenta o diagrama de irradiação 2D para o campo elétrico ($\theta = 90^\circ$), para o campo magnético ($\varphi = 0^\circ$), diagrama 3D com os eixos θ e φ indicados, de uma antena dipolo de $\frac{1}{4}\lambda_0$, em microfita, com frequência de ressonância em 2,45 GHz, substrato em FR4, $\epsilon_r = 4,4$, e espessura (h) = 1,6 mm, simulado no software comercial HFSS.

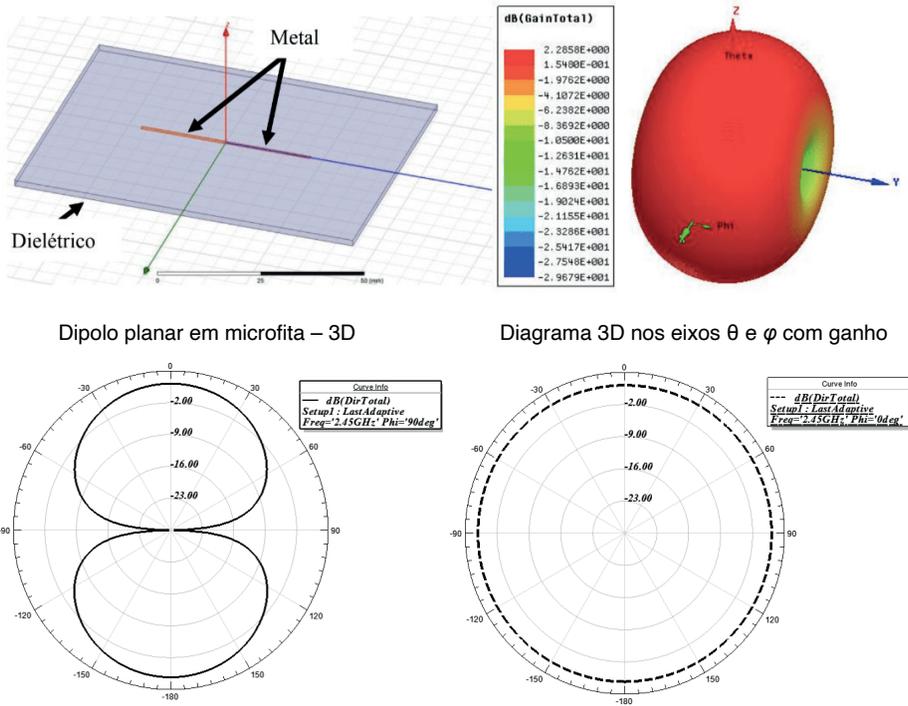


Figura 4. Dipolo planar com diagrama de irradiação 3D e 2D.

Fonte: Autor (2023)

3.1.2 Diretividade e Ganho

O ganho máximo de potência de uma antena na direção radial (θ , φ), pode ser definido como o raio de potência interceptado por uma estrutura próxima a antena, se a densidade de potência em (θ , φ) é irradiada isotropicamente [26]. A potência isotrópica indica que a potência (P_r) é irradiada sobre a superfície de uma esfera de raio, r . A potência total irradiada, P_T , é dada em:

$$P_T = \frac{1}{2} Re \int \int_S (E \times H^*) ds, \quad (5)$$

em que S é a superfície próxima ao campo. Assim a função de ganho de uma antena é obtida pela multiplicação da potência isotropicamente irradiada multiplicada pela área da esfera ($4\pi r^2$), utilizando a relação de (5), tem-se que o ganho, $G(\theta, \varphi)$, é dado por:

$$G(\theta, \varphi) = \frac{4\pi r^2 P_r(r, \theta, \varphi)}{P_T} \quad (6)$$

no campo distante, e usando (3.2), tem-se que,

$$G(\theta, \varphi) = \frac{2\pi r^2 |E(r, \theta, \varphi)|^2}{\eta_0 P_T}. \quad (7)$$

O máximo ganho de uma antena é o valor utilizado para descrever a desempenho de uma antena, outro termo utilizado é o ganho de máxima potência. O ganho tem relação direta com a potência de entrada da antena, ou a potência fornecida por um gerador à antena, medida em decibel. Para uma antena dipolo curto o irradiador isotrópico é de 3/2 ou 1,76 dBi, com o dBi indicando o ganho em decibéis sobre um irradiador isotrópico [26].

O ganho de uma antena com respeito a uma abertura uniformemente iluminada em amplitude e fase sobre uma área, A , é denominado de eficiência, η_a .

$$\eta_a = \frac{G_{m\acute{a}x}}{G_0}, \quad (8)$$

com $G_0 = (4\pi A)/\lambda_0^2$.

O ganho máximo de uma abertura por ser aproximado com HPBW θ_E graus no plano-E e θ_H graus no plano-H, dado por:

$$G_{m\acute{a}x} \approx \frac{4\pi}{\theta_E \theta_H} \approx \frac{41253}{\theta_E(\text{graus}) \theta_H(\text{graus})}. \quad (9)$$

A diretividade, D , é a qualidade relativa do ganho, definida por:

$$D = \frac{4\pi r^2 P_r(r, \theta, \varphi)}{\int \int_{4\pi} P_r(r, \theta, \varphi) r^2 d\theta d\varphi}. \quad (10)$$

A diretividade sempre é superior a 1, $D \geq 1$.

3.1.3 Impedância e Largura de Banda

Além das características de irradiação, no desenvolvimento de antenas, devem ser consideradas as características de impedâncias. A impedância da antena tem uma variável complexa Z_A ,

$$Z_A = R_A + jX_A, \quad (11)$$

em que R_A é a parte real ou resistiva, e X_A a parte imaginária (complexa) ou reativa da impedância da antena, com $j = \sqrt{-1}$. A parte real é composta por duas componentes, a perda ôhmica, R_L , e a perda de irradiação, R_r , ou resistência de irradiação da antena.

$$R_A = R_L + R_r, \quad (12)$$

Na Figura 5 é apresentado o circuito equivalente das perdas de uma antena,

conectado a um gerador, V_g , com impedância real, R_g , e a perda reativa e ôhmica é indicada em $R_r = Z_A$, e uma corrente I .

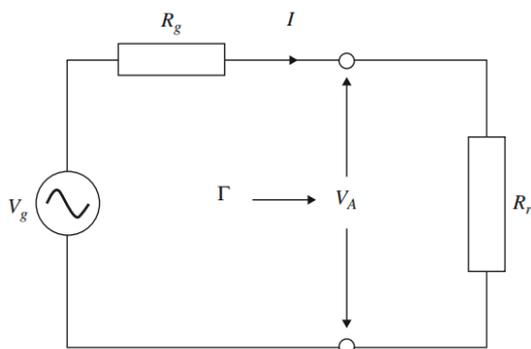


Figura 5. Circuito equivalente das perdas de uma antena com um gerador [26].

Fonte: Adaptado de Trevor [26].

A potência do gerador, P , entregue a antena é dada por:

em que $\text{Re}\{x\}$ é a parte real do número x e I^* é o complexo conjugado de I .

Considerando que a antena recebe apenas a parte real, a potência recebida pela antena é indicada como

$$P = \frac{1}{2} |V_g|^2 \left| \frac{R_g}{R_g + R_r} \right|^2 \frac{1}{R_r}, \quad (14)$$

com

$$V_A = \frac{R_g}{R_g + R_r} V_g, \quad (15)$$

e

$$I^* = I = \frac{V_A}{R_r}. \quad (16)$$

O valor de impedância que resulta na máxima potência transferida do gerador à antena, pode ser encontrado por:

$$\frac{\partial P}{\partial R_r} = 0. \quad (17)$$

Substituindo (16) em (14), encontra-se que, a condição de máxima transferência de potência para antena é encontrada, quando a impedância do gerador é igual a impedância da antena, ou,

$$R_r = R_g. \quad (18)$$

Nesta condição não há potência refletida da antena para o gerador, assim o coeficiente de reflexão (Γ) é zero

$$\Gamma = \frac{R_r - R_g}{R_r + R_g}. \quad (19)$$

A partir do coeficiente de reflexão é possível calcular o coeficiente de tensão de onda estacionária (*Voltage Standing Wave Ratio* – VSWR). Caso o elemento irradiador não apresente a mesma impedância da excitação, a potência cedida não será totalmente absorvida pelo irradiador, o restante da potência será refletido do irradiador para o transmissor, gerando uma onda estacionária. Para avaliação do parâmetro da antena, o critério geralmente adotado é o valor do $VSWR \leq 2$, o que caracteriza a largura de banda e garante que pelo menos 90% da potência de entrega será irradiado [8]. O VSWR é dado por:

$$VSWR = \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma}. \quad (20)$$

A impedância de uma antena, geralmente varia em função da frequência, e o casamento entre as impedâncias do gerador e da antena, também variam em função da frequência. Assim a antena operará eficientemente em banda restrita de frequência, a qual é chamada de largura de banda da antena. A frequência específica de melhor casamento das impedâncias apresenta maior perda de retorno, ou de menor coeficiente de reflexão, e é chamada de frequência de ressonância (f_0). A largura de banda é determinada pelas frequências mais baixas e mais altas, em que a degradação do casamento de impedâncias vai até o nível onde, o casamento de impedâncias é considerado como inaceitável para transmissão/recepção de um sinal.

Os níveis mais baixos e mais altos determinam os contornos da banda de frequências de transmissão/recepção de uma antena, ou a largura de banda da antena. Os níveis do coeficiente de reflexão para a determinação da largura de banda de uma antena, geralmente, são indicados em -10 dB, com $\Gamma^2 \leq 0,1$ ou -15 dB, com $\Gamma^2 \leq 0,03$, dependendo da aplicação. De forma genérica a largura de banda (*Bandwidth* – BW), ou banda passante da perda de retorno (*Return Loss* – RL), em função da frequência, de uma antena é dada pela diferença entre a frequência mais alta, f_2 , e a frequência mais baixa, f_1 , em -10 dB.

$$BW = f_2 - f_1. \quad (21)$$

Para antenas de pequena largura de banda, ou banda estreita, a largura de banda é expressa como porcentagem da frequência central, f_r , chamada de largura de banda fracionária, indicado por:

$$BW_{\%} = \frac{f_2 - f_1}{f_r} \cdot 100\%. \quad (22)$$

Com o parâmetro de perda de retorno é possível medir o casamento de impedância

de uma antena, o qual pode ser escrito em função do VSWR (dB), definido por:

$$RL(\text{dB}) = 20 \log \left(\frac{VSWR + 1}{VSWR - 1} \right) \quad (23)$$

Escrevendo (3.23) em função do módulo do coeficiente de reflexão ($|\Gamma|$), tem-se:

$$RL(\text{dB}) = -20 \log(|\Gamma|). \quad (24)$$

4 I ANTENA PCB ESPIRAL FLEXÍVEL PARA NB-IOT

Nesse projeto foi projetado uma antena PCB espiral flexível para NB-IoT, com a forma da letra P, operando na frequência de 877 MHz. Na Figura 6 pode ser observado a resposta em frequência da antena medida e simulada, com diferença na frequência de ressonância em 0,05%, e largura de banda de 10 MHz, cobrindo a faixa de 872 MHz a 882 MHz, perda de retorno inferior a -30 dB, demonstrando banda estreita, com largura de banda fracionária de 1,14%.

A frequência de ressonância em uma estrutura de compacta está relacionada ao comprimento das espiras, em que mesmo havendo três espiras, elas atuam em conjunto como uma única linha, e os espaçamentos entre as linhas não alteram a impedância da antena, não havendo acoplamento pela proximidade das linhas, e a largura e banda é característica desse tipo de antena.

Na Figura 7 podem ser visualizado o diagrama de irradiação 3D e 2D da antena PCB espiral flexível, com diagrama de irradiação onmidirecional, ou seja, a antena irradia potência para todas as direções, exceto na direção do dielétrico, ganho máximo de 5,12 dBi, Figura 7(a), largura de feixe de meia potência, ou seja, com queda da maior potência de -3 dB, de 108°.

O ganho da antena está diretamente relacionado a quantidade de metal do elemento irradiante, como as trilhas são finas, com espessura de 0,5 mm, o ganho é inferior a 6 dBi, porém este fator proporciona uma maior densidade de corrente, como observado na Figura 8.

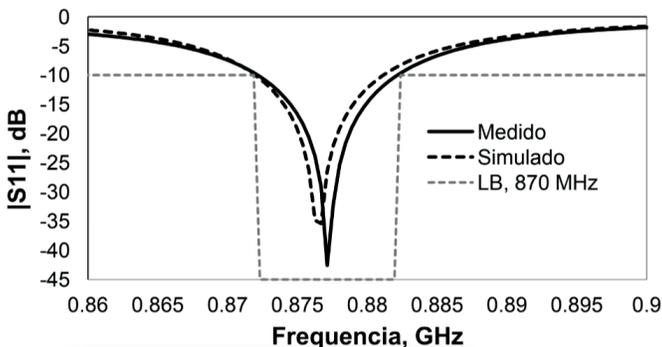
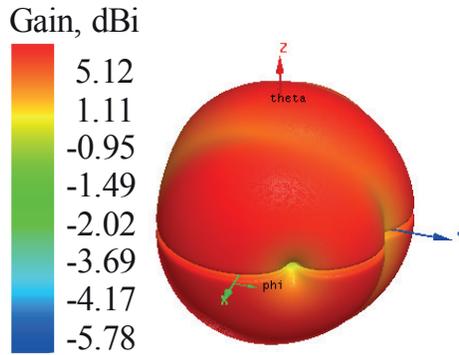
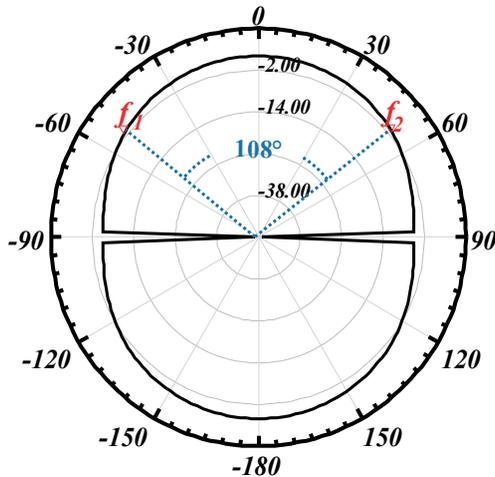


Figura 6. Resultado da resposta em frequência antena PCB espiral flexível simulada e medida.



(a)

Figura 7. Diagrama de irradiação simulado da antena PCB espiral flexível: a) 3D com indicação de ganho máximo; b) 2D com a indicação da largura de feixe de meia potência.



(b)

Figura 8. Desdensidade de corrente (A/m^2) da antena PCB espiral flexível simulada.



CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho é desenvolvida uma antena projetada e construída em placa de circuito impresso espiral, com a forma da letra P, aplicada à Internet das Coisas de banda estreita, operando na banda de 880 MHz, e construída em dielétrico flexível, laminado de poliamida. A partir dos resultados observou-se que a antena obteve dimensão compacta, com uma área total de 5,5 cm², largura de banda de 10 MHz, com diferença entre a simulação e medição inferior a 0,5%, largura de feixe de meia potência de 108°, e ganho máximo de 5,5 dBi.

AGRADECIMENTOS

Os autores são gratos a todo o suporte dado a este trabalho pela Universidade Estadual do Maranhão (UEMA), CAPES, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Programa de Apoio a Núcleos de Excelência (Pronex), Fundação de Amparo à Pesquisa e o Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Maranhão (FAPEMA), e a Universidade Federal do Maranhão (UFMA).

REFERÊNCIAS

1. J. Y. Khan e M. R. Yuce, "Wireless Body Area Network (WBAN) for Medical Applications," em *New Developments in Biomedical Engineering*, Shanghai, InTech Open, 2010, pp. 590-628.
2. J. Zhang, P. V. Orlik, Z. Sahinoglu, A. F. Molisch e P. Kinney, "UWB systems for wireless sensor network," *Proceedings of the IEEE*, vol. 97, n° 2, pp. 313-331, 2009.
3. M. Hernandez e R. Miura, *Body Area Networks using IEEE 802.15.6 Implementing the Ultra Wide Band Physical Layer*, London: Elsevier, 2014.
4. A. S. F Evangelista, "Desenvolvimento de antenas em poliamida com a geometria pre-fractal de ear" Mestrado, Programa De Pós-graduação Em Engenharia Da Computação E Sistemas, UEMA, 2020.
5. S. C. Survase e V. V. Deshmukh, "Design of earable antenna for telemedicine application," *International Journal of Engineering Science and Innovative Technology*, vol. 2, pp. 574-580, March 2013.
6. A. Dierk, "Dual band rectangular patch wearable antenna on jeans material," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 61, n° 2, pp. 532-538, 2013.
7. Q. Luo, S. Gao, M. Sobhy, J. Li, G. Wei, and J. Xu, "A broadband printed monofilar square spiral antenna: A circularly polarized lowprofile antenna." *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 59, no. 2, pp. 79–87, 2017.
8. C. A. Balanis, *Antenna theory: analysis and design*. John wiley & sons, 2015.
9. Q. Luo, S. Gao, M. Sobhy, J. Li, G. Wei, and J. Xu, "A broadband printed monofilar square spiral antenna: A circularly polarized lowprofile antenna." *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 59, no. 2, pp. 79–87, 2017.

10. H.-K. Oh, W. Wang, K. Lee, C. Min, and S. Yang, "The development of a wireless love wave biosensor on 41 yx linbo3," *Smart Materials And Structures*, vol. 18, no. 2, p. 025008, 2009.
11. A. B. Smolders, H.J. Visser, U. Johannsen. "Modern Antennas and Microwave Circuits," Eindhoven: Eindhoven University of Technology, 2022.
12. A. Banerjee. "Planar Spiral Inductors, Planar Antennas and Embedded Planar Transformers – SPIICE-based Design and Performance Evaluation for Wireless Communications," Cham: Springer, 2023.
13. J. Salazar, S. Silvestre. "Internet of things," Prague: Techpedia, 2017.
14. J. Gubbi, R. Buyya, S. Marusic and M. Palaniswami, "Internet of Things (IoT): A vision architectural elements and future directions", *Future Gener. Comput. Syst.*, vol. 29, no. 7, p. 1645-1660, Sep. 2013
15. 3GPP. 3GPP TS 36.211, Physical channels and modulation (Release 13, v13.9.0). Technical report, 3GPP, April 2018.
16. 3GPP. 3GPP TS 23.401, General Packet Radio Service (GPRS) enhancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) access (Release 13, v13.14.0). Technical report, 3GPP, January 2020.
17. J. Schlienz and D. Raddino. Narrowband Internet of Things – Whitepaper. Technical report, Rohde & Schwarz, 2016.
18. Silva Junior, P.F., Santana, E.E.C., Pinto, M.S.S. et al. Flexible Wearable Pre-fractal Antennas for Personal High-Temperature Monitoring. *Wireless Pers Commun* 114, 1983–1998 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11277-020-07458-0>.
19. H. Khaleel, *Innovation in Wearable and Flexible Antennas*, New York: WIT Press, 2015.
20. P. F. Silva Junior, et al., "Fractal and Polar Microstrip Antennas and Arrays for Wireless Communications," *Wireless Mesh Networks – Security, Architectures and Protocols*. IntechOpen, May 13, 2020. Doi: 10.5772/intechopen.83401.
21. D. P. AC, "Flexible circuit material - technical information," 2016. [Online]. Available: http://www.dupont.com/content/dam/dupont/products-and-services/electronic-and-electrical-materials/flexible-rigid-flex-circuit-materials/documents/PyraluxACclad_DataSheet.pdf. [Acesso em 20 jul 2023].
22. A. S. M. Z. Kausar, A. W. Reza, A. A. Latef e M. H. K. M. E. Ulla, "Optical nano antenas: state of the art, scope and challenges as a biosensor along with human exposure to nano-toxicology," *Sensors*, vol. 15, pp. 8787-8831, 2015.
23. C. Tripon-Canselite e J. Chazelas, *Nanoscale Microwave Engineering - Optical Control of Nanodevices*, Hoboken: Wiley, 2014.
24. F. B. Gross, *Smart Antennas with MATLAB*, San Francisco: McGraw Hill, 2015.
25. T. S. Bird, *Fundamentals of Aperture Antennas and Arrays - From Theory to Design, Fabrication and Testing*, Chichester: Wiley, 2016.
26. S. B. Trevor, *Fundamentals of Aperture Antennas and Arrays: From Theory to Design, Fabrications and Testing*, Chichester: Wiley, 2016.