

Análise e Simulação de uma Antena Planar Aplicada a LoRa

Leonardo Marques de Freitas
Universidade Federal Rural do Semi-Árido,
UFERSA
Mossoró, Brasil
leomqs.eng@gmail.com

Humberto Dionísio de Andrade
Universidade Federal Rural do Semi-
Árido, UFERSA
Mossoró, Brasil
humbertodionisio@ufersa.edu.br

Matheus Emanuel Tavares Sousa
Universidade Federal Rural do Semi-Árido,
UFERSA
Mossoró, Brasil
matheus.sousa@ufersa.edu.br

Resumo—Este trabalho tem como objetivo uma análise de uma antena planar, de microfita, com aplicação em LoRa®, relacionando a utilização desta com o protocolo de comunicação LoRaWAN®, cujo opera no Brasil em 915 MHz. A antena de microfita desenvolvida terá configuração em patch retangular e serão analisados os parâmetros eletromagnéticos da antena através do coeficiente de reflexão, diagramas de radiação 2D e 3D, e ganho, com o intuito de demonstrar a operabilidade desta antena para serviços de comunicação em LoRaWAN®. Dentre os principais benefícios da utilização desta antena para esta finalidade, deve-se destacar o baixo perfil, feixes diretivos e facilidade de implementação.

Palavras-chave—LoRaWAN®, Antena, Microfita, IoT

1. INTRODUÇÃO

A busca por sistemas eficientes e seguros de comunicação se tornaram mais intensas após a terceira revolução industrial, isto torna-se evidente ao se verificar que o alicerce de uma empresa que trabalha com trânsito de dados é a confiabilidade que o usuário terá com a utilização do mesmo. O recente termo ligado a interação entre o meio físico e digital IoT (*Intenet of Things*) está dentro desta necessidade de seguridade.

IoT é considerado nos dias atuais a nova evolução da internet, representando um grande avanço devido a velocidade em reunir, analisar e distribuir dados que podem ser convertidos em informações precisas de um evento [1]. Tais sistemas são caracterizados por uma baixa taxa de transmissão de dados, o que reduz drasticamente largura de banda necessária, e normalmente são desenvolvidos para frequências acima de 1 MHz [2].

A utilização deste tipo de interação (IoT) estão sendo vastamente utilizados na indústria 4.0, que se refere a modificação da logística de bens e transportes com o intuito da automação, reduzindo os custos operativos, e aumentando a qualidade do produto fornecido, isto se dá pela conectividade entre os equipamentos e máquinas, que possuem resposta automática a um padrão de produção ou defeito, evitando o aumento dos custos de produção e as perdas de materiais por paradas ou erros sequenciais [3]. Além destes modelos operativos, tem-se a utilização na agricultura de precisão, um dos avanços tecnológicos que permite o aumento dos insumos produzidos de maneira eficiente. A Figura 1 representa a integração do modelo de indústria 4.0 em IoT.



Figura 1. Integração Indústria 4.0 em IoT [3]

Tendo em vista o conceito global de IoT, há a necessidade de determinar os dispositivos e o modo de comunicação no qual possibilitará a troca de dados. Dos modelos de comunicação conhecidos, tem-se os mais conhecidos Wi-Fi WLAN (2,4GHz), Bluetooth, ZigBee e GSM(Global System for Mobile Communications). Cada um destes possuem um grau específico de segurança de tráfego de dados, frequência máxima de dados a serem transmitido (fator importante caso seja necessário enviar fotos ou vídeos), distância máxima para realizar a troca de dados e custos operativos.

A comunicação Bluetooth é o método utilizado para pequenas distâncias para evitar o uso de cabo para comunicação entre um computador e dispositivos. As principais vantagens deste modelo de comunicação são pela possibilidade de transmissão simultânea de áudio e vídeo, interface de controlador Host, e possibilidade de aplicação em softwares [4].

A rede Bluetooth é caracterizada como uma rede (WPAN - Rede de área pessoal) com tecnologia baseada no padrão IEEE 802.15.1, cujo foi lançado em 1994 pela Ericsson. Utiliza a frequência ISM em 2,4 GHz, com uma largura de banda de 1 MHz e o modo de comunicação é através da técnica de transmissão de espectro de propagação de salto de frequência, que possibilita uma taxa máxima de dados de 1 Mb/s e o consumo de energia depende da distância entre o receptor e o transmissor, outras alternativas de Bluetooth foram desenvolvidas para desempenhar um papel com baixo consumo de energia, o conhecido como Bluetooth 4.0 [5]. As principais desvantagens é a baixa distância de comunicação,

alto consumo de energia em comparação com outros tipos de modelos, a limitação de mestre e escravo entre os dispositivos sensores e a baixa segurança do dado a ser transmitido. A Figura 2 representa a arquitetura de comunicação Bluetooth, cujo possui dispositivos mestres centrais, responsáveis pela recepção dos dados de sensores identificados como escravos, que podem ser móveis ou estáticos, além de também há a possibilidade de Standby, seja por fator de não utilização no momento ou por não estar dentro do alcance da comunicação.

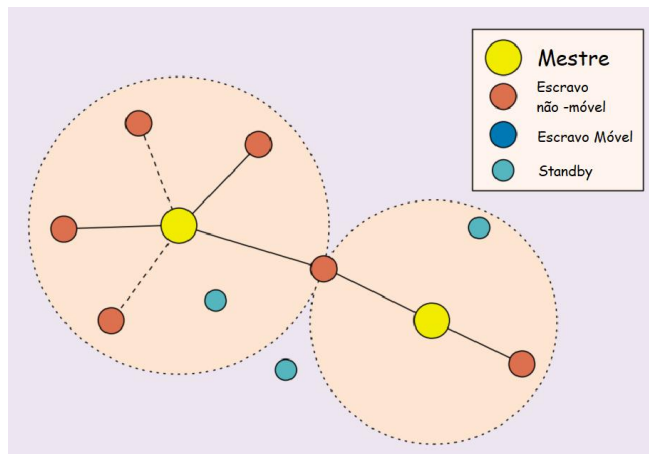


Figura 2. Arquitetura Bluetooth de comunicação, adaptada [4]

Outro modelo de comunicação conhecido é o ZigBee, cujo se baseia em um padrão baseado no protocolo de rede desenvolvido pela Alliance ZigBee, que utiliza serviços de transporte específico de rede, possui um baixo consumo de energia, caracterizando como um LPWAN e possui rede de segurança em suas camadas de aplicação.

As principais desvantagens do uso de ZigBee é a limitação em até 150 metros da comunicação e não fornece proteção dos dados ponta a ponta como em outros serviços. Assim como os principais serviços de IOT, é realizada uma combinação de aplicação para o uso do ZigBee, cujo possui o Coordenador, o roteador e os dispositivos finais como pode-se observar na Figura 3 [6].

Dentre as partes lógicas da comunicação em Zigbee, o coordenador representa a raiz da rede, no qual poderá fazer pontes de comunicação para outras redes existentes, e somente poderá haver um coordenador por rede. O mesmo é responsável por iniciar a rede selecionando os parâmetros operacionais, e também poderá armazenar informações relativas a chaves de segurança por exemplo.

A parte lógica de roteador, são os intermediários, que fazem a retransmissão do sinal de outros dispositivos; este permite a inclusão de dispositivos adicionais para realização de alguma forma de controle e monitoramento. Além destas, tem-se a parte lógica dos dispositivos finais, cujo o principal objetivo é a coleta de dados, através de sensores, no qual, dependendo da aplicação é a redução do gasto de energia, se utilizando de baterias e recargas por meios alternativos, como a geração solar, por exemplo.

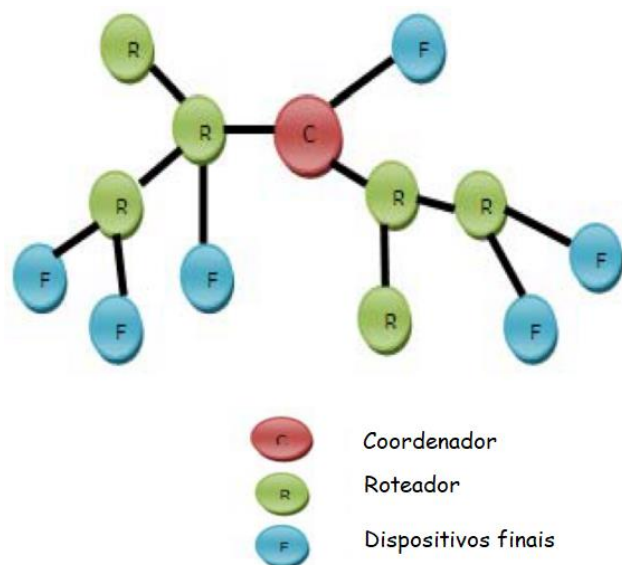


Figura 3. Diagrama padrão de comunicação em ZigBee, adaptado [6]

O modelo mais conhecido de comunicação é o Wi-fi em 2,4GHz, isto é, devido a possibilidade de alta taxa de dados, ao contrário de modelos de comunicação como Bluetooth ou ZigBee. No entanto, quando se refere a uma solução que enquadre distância e seguridade, o modelo convencional se torna inviável, pela facilidade de detecção da informação a ser transmitida de um ponto a outro, além da distância da informação pela característica de baixa penetração em obstáculos e alcance do sinal [5].

A característica estrutural de uma comunicação que se enquadra como IoT deve seguir principalmente o modelo de 4 camadas. Das quais, estão divididas em sensor, conectividade, banco de dados e aplicação. A Figura 4 representa a arquitetura IoT de maneira simplificada.



Figura 4. Arquitetura simplificada IoT, adaptada [7]

A camada de sensorização ou de dispositivos refere-se aos objetos físicos ativados por meio de um sensor, ou seja, hardwares que fornece funcionalidade de detecção,

comunicação, monitoramento ou controle. Um exemplo objetivo disto, são os sensores de códigos de barras, infravermelho, dentre outros. A camada de conectividade ou camada de computação é a que define qual o canal de comunicação que será responsável pelo envio das informações fornecidas pelo sensor para a camada de banco de dados. Esta é responsável por armazenar as informações, analisar e dar uma resposta final a uma aplicação, normalmente esta camada é caracterizada como um gerenciamento de aplicações, isto porque em IoT diferentes dispositivos são alocados para atender diferentes serviços, no qual cada objeto integrado conecta-se com os do mesmo tipo, e, desta maneira, é processado uma decisão automática conforme na base de dados obtidos pelos sensores e definida pelo usuário, cujo representa a última camada de aplicação. [7]

A necessidade do fator segurança, custo e facilidade de implementação que não são obtidos em sua totalidade através destes modelos convencionais, possibilitaram a implementação de novos modelos, dentre elas, a mais conhecida é a LoRaWAN[®]. Que se baseia em um modelo com baixo consumo de energia e alto alcance, além de, garantir comunicação bidirecional e um alto grau de segurança da informação a ser transmitida [2], incluindo a possibilidade de informações de localização a partir de triangulação de sinais [8].

II. REFERENCIAL TEÓRICO

LoRa[®] baseia-se na modulação por espelhamento espectral que mantém as características de baixa potência da modulação FSK (*Frequency-shift keying*), possibilitando o aumento significativo do alcance do sinal. Referindo-se ao modelo OSI (*Open System interconnection*) que divide o modelo de protocolos de comunicação em Física, Enlace, rede, transporte, sessão, apresentação e aplicação, a LoRa[®] está presente na parte física e de enlace. A Figura 5 representa a relação de interconexão proposto pelo protocolo e a Figura 6 representa as camadas do modelo OSI.



Figura 5. Internet das coisas aliada a LoRa [9].



Figura 6. Camadas de comunicação do modelo OSI. [10]

Em contrapartida, LoRaWAN[®] é um protocolo de comunicação, que está presente no sistema OSI como Enlace e rede, por representar a parte de software do modelo. De maneira geral, o protocolo LoRaWAN[®] é a arquitetura da rede de comunicação enquanto a rede física LoRa[®] permite o link de comunicação em longo alcance [5]. Uma das características importante da comunicação em LoRaWAN[®] para aplicações no Brasil, é relativa a limitação de faixa de frequência disponibilizada para a aplicação. Na China, tem-se intervalo de frequência de 779 até 787 MHz e 470 até 510 MHz, na Europa o intervalo é 863 até 870 MHz e nos Estados Unidos entre 902 a 928 MHz. No Brasil, assim como nos EUA a frequência disponibilizada está entre 902 a 928MHz, cujo possibilitaria 64 canais para uso deste protocolo de comunicação, entretanto, o intervalo de frequência 907,5 até 915 MHz possui a regulamentação destinada a SMP (Serviço Móvel Pessoal) em serviços GSM e para utilização desta faixa de frequência, se torna necessário a autorização da Anatel (Agência Nacional de telecomunicações) [11], esta faixa representa 40 dos 64 canais da faixa de frequência total, entretanto os 24 canais disponíveis ainda são suficientes para utilizar a maioria dos dispositivos de comunicação LoRa, das quais somente requisitam no máximo 8 canais de comunicação e transmissão de dados. A Figura 7 simplifica a divisão de faixas de frequências para este protocolo de comunicação.

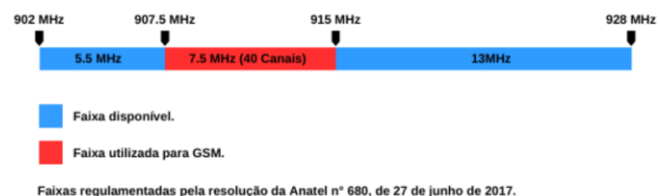


Figura 7. Faixas de frequências para LoRa no Brasil.[12]

Por continuidade ao modelo OSI para permitir a troca de dados, a camada sucessora é a de transporte, que são as conexões ponto a ponto realizadas através de antenas receptoras e transmissoras. Dado a necessidade de comunicação em uma direção, com objetivo de realizar uma topologia estrela (Figura 8), no qual todas as aplicações estão direcionadas para um ponto central da rede, o modelo de antena que melhor se enquadra são as antenas de microfita.

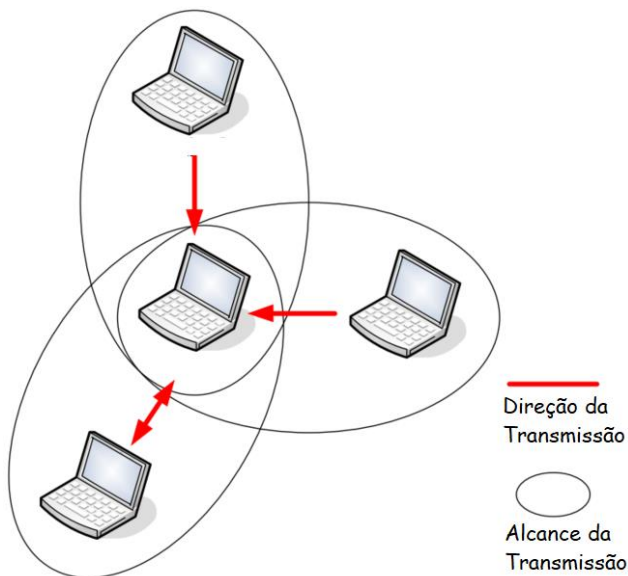


Figura 8. Comunicação Topologia Estrela Adaptada [13].

Antena de microfita baseia-se em uma fita metálica de pequena espessura posicionada a uma distância específica de um plano de terra, quando este material delimitador possui propriedades dielétricas específicas, chamado de substrato [14]. Este modelo de antena possui diversos modos de configuração de patch e de alimentação, dentre as mais conhecidas, tem-se ao tipo patch retangular com alimentação através de uma linha de transmissão. As principais vantagens de utilização das antenas de microfita é relativo ao baixo peso, fácil fabricação e alta adaptabilidade em superfícies planas. A Figura 9 representa o modelo de uma antena de microfita proposta.

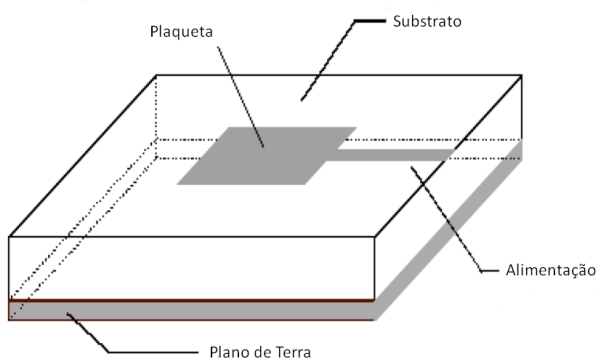


Figura 9. Modelo de antena de Microfita, adaptado [15]

Uma das otimizações do uso de LoRaWAN é facilidade de implementação de dispositivos, estes podem ser prontos de fábrica ou com possibilidade de implementação de sensores e serviços, dentre estes, há os dispositivos embarcados. Os embarcados são dispositivos que permitem integração de módulos, sensores e possibilitam a programação destes para um objetivo final.

Um dos principais dispositivos embarcados no mercado é a plataforma Arduino, cujo baseia-se em um protótipo

eletrônico de hardware livre e placa única, projetada com um microcontrolador Atmel AR com suporte a entradas e saídas digitais e analógicas. A programação para estes é derivada da linguagem C/ C++, portanto de fácil implementação. A Figura 10 representa um Arduino Mega 2560 cujo pode ser integrado a um módulo de comunicação LoRa (Shield Dragino) representado na Figura 11.



Figura 10. Arduino Mega 2560.

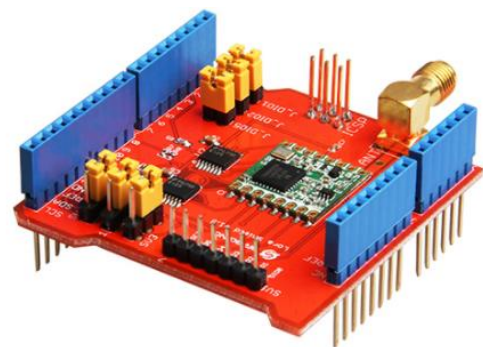


Figura 11. Lora Dragino Shield,[16]

Neste trabalho será desenvolvido uma antena de patch retangular, utilizando substrato com constante dielétrica igual a 6,15 (RT/duroid 6006) na faixa de frequência 902 - 928MHz, que representa o intervalo de frequência destinado para desenvolvimento ISM (*Industrial, Scientific and Medical band*) com aplicabilidade em equipamentos que se utilizem do protocolo de comunicação LoRaWAN®.

III. METODOLOGIA

Os meios utilizados para o desenvolvimento da antena de microfita de patch retangular se decorreram através da aplicação dos conhecimentos sintetizados por Balanis [14], além de simulações computacionais desenvolvidas nos softwares SciLab® e Ansys HFSS 2019®, que possibilitaram a obtenção dos valores físicos da antena, além dos resultados obtidos, tais como, coeficiente de reflexão, diagramas de radiação, dentre outros.

A. Característica da Antena de microfita

As dimensões físicas da antena dependem de fatores como substrato, frequência e o meio no qual será procedida a comunicação. O substrato é um material com características dielétricas, que atua armazenando a energia de acordo com a frequência de operação da antena. O substrato mais utilizado para o desenvolvimento destes modelos de antena, por ser de fácil manuseio e baixo custo, é o FR4, cujo possui constante

dielétrica igual a 4,4, contudo, para o desenvolvimento de projetos em UHF, no qual é fundamental o baixo perfil da antena, se utilizam materiais com propriedades dielétricas maiores.

O material designado para o substrato é o RT/duroid 6006® que é um composto cerâmico PTFE destinado para circuitos eletrônicos que requerem uma alta constante dielétrica, cujo valor é igual a 6,15 [17]. A espessura do material escolhido é igual a 1,9 mm. A Tabela 1 representa alguma das propriedades físicas do material, cujo são importantes para a obtenção do resultado simulado.

Tabela 1. Constantes RT/Duroid 6006

Propriedade	Valor
Constante dielétrica	6,15 (+0,15) (-0,15)
Fator de dissipação	0,0027
Coefficiente térmico	- 410 ppm/°C
Resistividade superficial	7×10^7 Mohm
Condutividade térmica	0,49 W/m/°K
Densidade	2,7 g/cm ³

A frequência de operação será em 915 MHz, devido a destinação da faixa de frequência de 902 até 928 MHz para utilização ISM (*Industrial, Medical and Scientific*), que possibilitam para a aplicação LoRaWAN® em 64 canais de comunicação. Este intervalo de comunicação possui algumas restrições no Brasil devido a utilização do mesmo em serviços de telefonia móvel, que utiliza o intervalo entre 907,5 até 915MHz [18], devido a esta redução de faixa, há a necessidade de reconfiguração do gateway dos dispositivos para pular esta faixa de frequência, isto implica em uma redução de 40 dos 64 canais disponíveis, contudo, a maior parte dos equipamentos que utilizam este serviço só possuem no máximo 8 canais, tornando viável a utilização deste serviço no país em destaque.

As dimensões físicas de largura e comprimento do patch antena foram determinados através do método da cavidade [14] e estão representados na Figura 12 e Tabela 2.

B. Característica da linha de transmissão

A alimentação da antena pode ser realizada de diversas maneiras, dentre elas, por linha de microfita, sonda coaxial, acoplamento por abertura e acoplamento por proximidade. A opção de alimentação utilizada foi a partir de uma linha de microfita, considerando um valor de impedância da entrada de 50 ohm. O valor de largura foi determinado conforme Balanis [14] através da aplicação do método numérico da bisseção desenvolvido com auxílio do software SciLab®. O valor de comprimento da linha de transmissão foi determinado conforme Huang e Boyle [19], no qual admite-se que o valor da linha de microfita deve ser determinado conforme as características do comprimento de onda da maior frequência de ressonância da antena. A Figura 12 e a Tabela 2 representa os valores físicos obtidos para o uso em simulação.

C. Método de casamento de impedância

Um dos principais métodos utilizados para realizar o casamento de impedância de uma antena de microfita é através do inset feed, que consiste em um par de fendas em paralelo com a linha de transmissão de mesma espessura da camada condutora [20]. Os valores físicos foram obtidos através de simulações em SciLab® conforme Ramesh e Yip [21]. A Figura 12 e a Tabela 2 representam os valores físicos obtidos através das simulações.

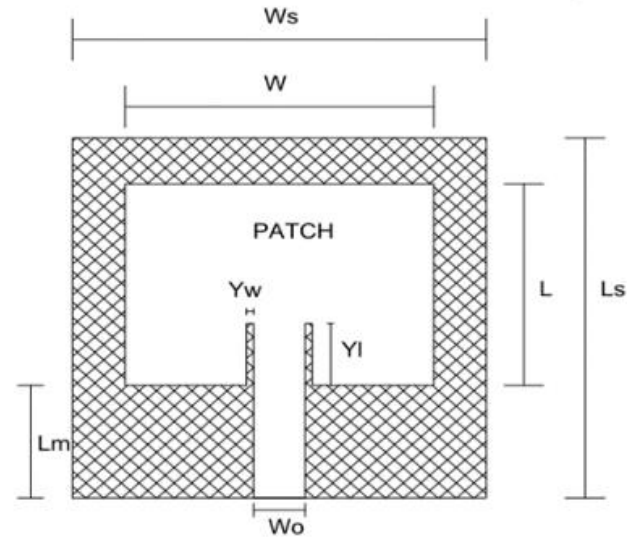


Figura 12 (a). Vista frontal representativa da antena de microfita.

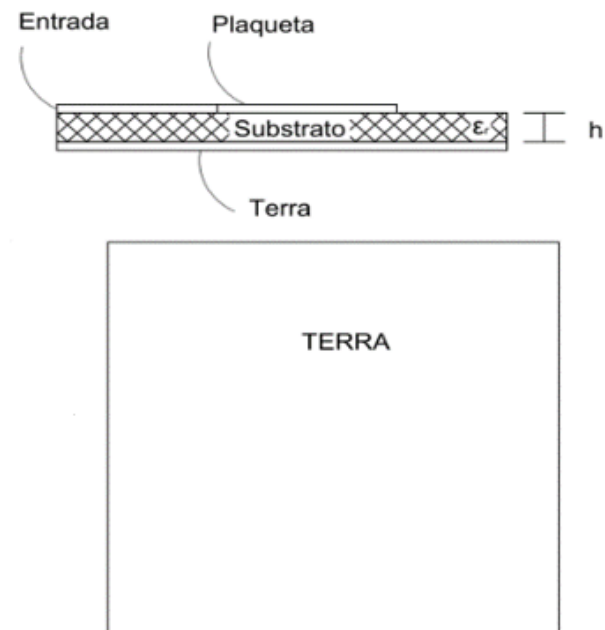


Figura 12 (b). Vista lateral e traseira representativa da antena de microfita.

de banda foi igual a 9MHz que em termos percentuais, é igual a 0,98%.

Tabela 2. Constantes físicas da antena

Parâmetro	Dimensões (mm)
Largura do Patch (W)	84,24
Comprimento do patch (L)	64,10
Largura da linha de transmissão (Wo)	2,14
Comprimento da linha de transmissão (Lm)	34,19
Largura do substrato (Ws)	98,99
Comprimento do substrato (Ls)	108,71
Largura do inset feed (Yw)	0,97
Comprimento do inset feed (Yl)	22,97

IV. RESULTADOS E ANÁLISE

A partir dos valores da antena obtidos em simulações no SciLab foi possível a modelagem tridimensional da antena e inserção dos valores no software Ansys HFSS®, com o intuito de obter dados referente a largura de banda, diagrama de radiação 2D e 3D, coeficiente de reflexão, além de informações relativas a eficiência da antena projetada. A Figura 13 representa a antena modelada no software.

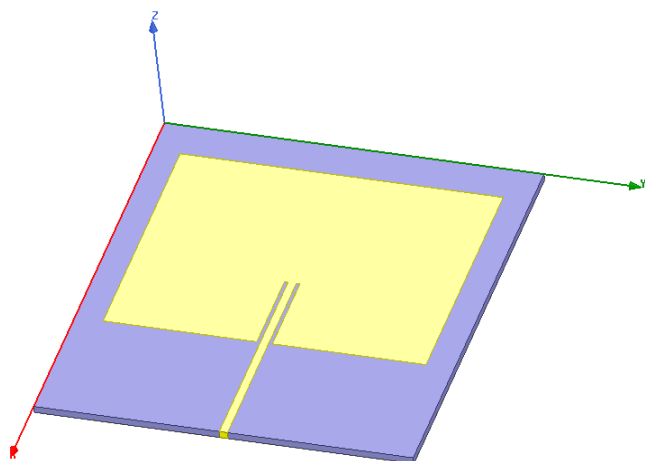


Figura 13. Antena modelada no Ansys HFSS®.

A. Coeficiente de reflexão

Define-se como o coeficiente de reflexão a correlação entre a potência fornecida e a refletida da antena [22], no qual, a partir da obtenção deste dado, é possível identificar se a frequência que a antena está ressoando é a desejada, além de identificar se a largura de banda está de acordo com o esperado. A Figura 14 representa o gráfico do coeficiente de reflexão da antena, no qual obteve um valor de máxima ressonância na frequência de 915 MHz e -20,34 dB a largura

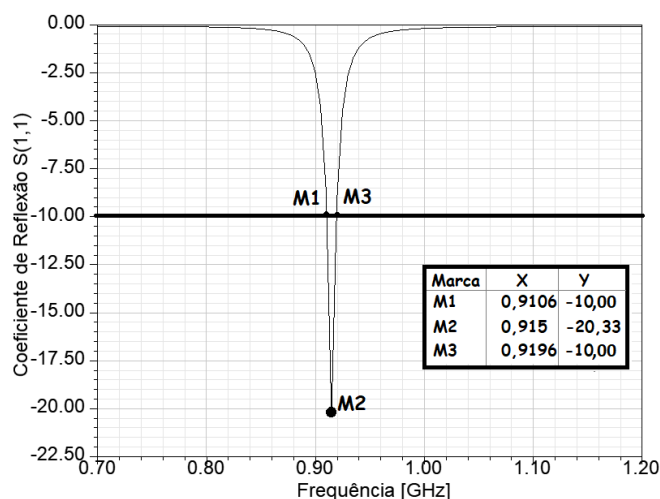


Figura 14. Coeficiente de reflexão.

B. Diagramas de radiação 2D e 3D

Os diagramas de amplitude de radiação representam as propriedades eletromagnéticas da antena em coordenadas espaciais [14]. A partir do gráfico em 2D é possível compreender as características diretivas do campo elétrico e magnético (Figura 15) que demonstram que a antena, assim como esperado de uma microfita, possui seus campos eletromagnéticos voltados para apenas uma direção. Por conseguinte, o gráfico de radiação em 3D tem como por objetivo a representação do ganho máximo da antena, que assim como representado na Figura 16 foi igual a 3,55 dB.

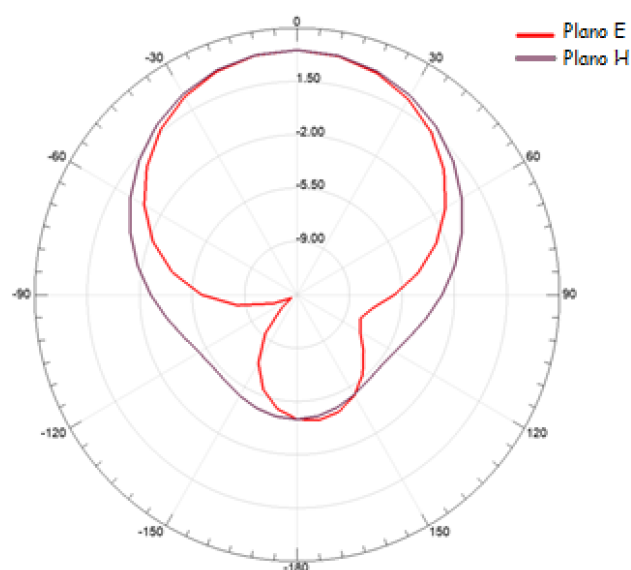


Figura 15. Diagrama de radiação polar.

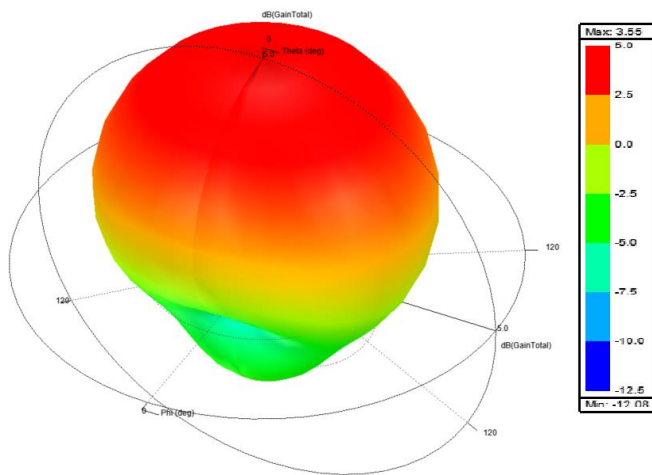


Figura 16. Diagrama de radiação em 3D.

C. VSWR (Voltage Standing Wave Ratio)

A relação de onda estacionária de tensão (VSWR) é representada pela razão entre as ondas estacionárias refletidas e transmitidas por uma antena de radio frequência. De maneira simplificada, o VSWR representa uma medição de quão eficiente a energia RF é transmitida da fonte de energia para a plaqueta através da linha de transmissão [23]. A partir deste dado é possível verificar a incompatibilidade de uma antena em relação a linha de transmissão conectada a ele, cujo o intervalo é a partir de 1. Para uma antena ideal, onde não há qualquer incompatibilidade entre a linha e a antena, tem-se que a relação VSWR é igual a 1:1. A relação de onda estacionária da antena de microfita projetada foi igual a 1,67:1, no qual representa boas características de compatibilidade. A Figura 17 representa o resultado VSWR da antena simulada.

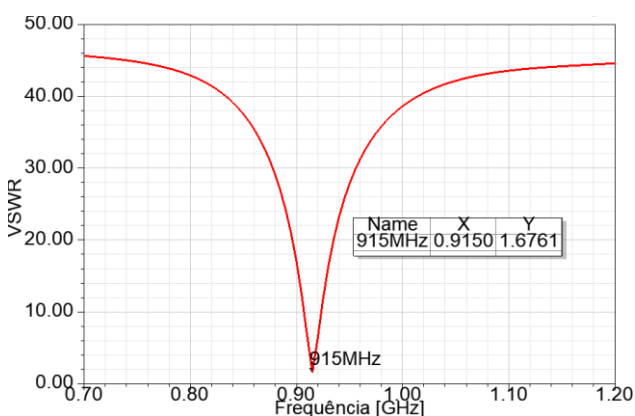


Figura 17. Curva VSWR obtida em simulação.

D. Densidade de corrente superficial

Outra maneira de avaliar o desempenho de uma antena é a partir da densidade de corrente ao longo da mesma. A partir dela, é possível obter as informações do fluxo elétrico ao longo da antena, e a partir disto, verificar a necessidade ou não de realizar chanfros ou aberturas. A Figura 18 representa a densidade de corrente superficial da antena em A/m², no qual, a maior corrente superficial identificada está localizada,

assim como esperado, nas extremidades da antena, igual a 52,4 A/m².

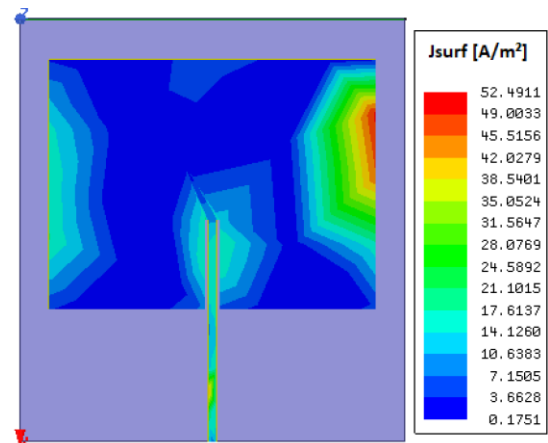


Figura 18. Representação de densidade de corrente superficial da antena simulada

E. Carta de Smith

Uma antena de microfita pode ser representada por um circuito elétrico com impedâncias de entrada e saída, cujo principal objetivo para que a mesma possa ressoar em uma frequência específica é a garantia dos valores de reatância próximas de zero e o valor resistivo equivalente da antena próxima da entrada, no qual a antena em questão é 50 Ohm. De maneira simplificada, a transição entre a linha de transmissão de entrada e a estrutura radiante deve promover um mecanismo eficaz de transferência de energia entre as mesmas, e este parâmetro está associado ao modo de conexão do elemento irradiador com a fonte [24].

Um projeto adequado de antena de microfita está diretamente associado aos aspectos construtivos, permissividade, espessura do dielétrico, geometria do patch e o plano terra, das quais definem as características de resposta em frequência, eficiência e radiação [24]. A Figura 19 representa a carta de Smith da antena simulada, cujo obteve valor normalizado igual a 0,9583+j0,1845, e o valor real é igual a 47,915+j9,225 Ohm.

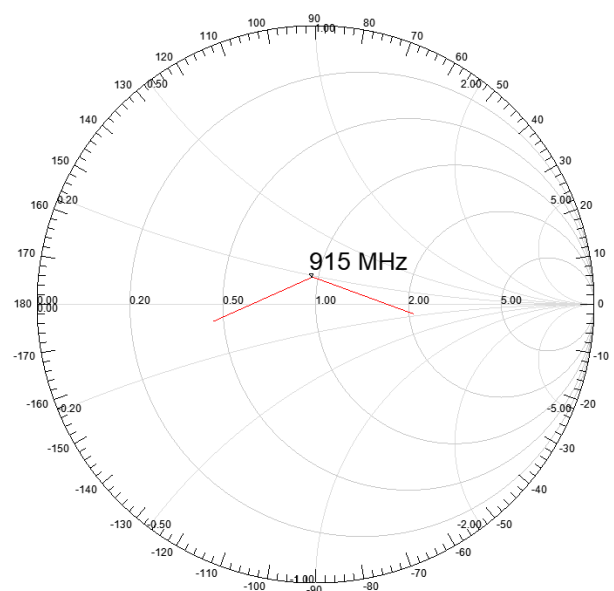


Figura 19. Carta de Smith da antena simulada.

F. Aplicabilidade do modelo de antena proposto

A partir do desenvolvimento da antena de microfita e utilização de dispositivos embarcados, se torna possível a integração deste sistema, em um modelo real. Este modelo se baseia na utilização de embarcados, este em questão o Arduino Mega 2560 com Shield Dragino LoRa e antena de microfita desenvolvida, entretanto podem ser utilizados outros embarcados como Raspberry Pi, Atmel ATSAMD21G18, módulo *transceiver* RFM95W, dentre outros. A estrutura da comunicação proposta pode ser observada na Figura 20. O objetivo da mesma é obter informações através de sensores ligados a plataforma Arduino e comunicar através do protocolo LoRaWAN para um servidor em nuvem, com o objetivo de servir como banco de dados, para que um usuário possa tomar uma ação ou somente observar os dados coletados.



Figura 20. Estrutura de comunicação.

O dispositivo final poderia ser utilizado em locais onde não possui rede elétrica, e desta maneira, seria alimentado através de uma bateria e uma pequena placa solar com a função de recarregar o banco. Este se comunicaria através de apenas um canal de comunicação para um servidor, dentre os mais utilizados tem-se o servidor TTN (*The Things Network*), este por meio da internet, encaminhariam as informações resultado para um computador principal realizar alguma ação ou apenas observar os dados obtidos em teste. A Figura 21 representa a aplicação da comunicação LoRaWAN com a plataforma TTN.

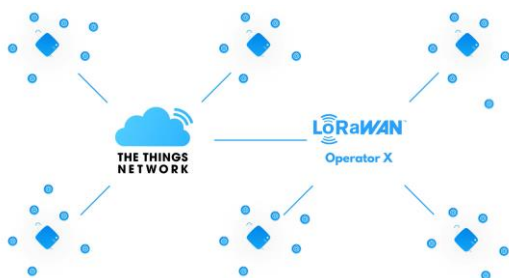


Figura 21. Interconexão entre servidor TTN e protocolo LoRaWAN [25]

Neste trabalho foi apresentado uma análise e simulação de uma antena de microfita de baixo perfil desenvolvido para utilização em dispositivos que necessitem de diretividade na radiação eletromagnética para modelo de comunicação em topologia estrela. Verificando um baixo perfil, frequência de máxima ressonância em 915 MHz, porém um ganho não satisfatório para comunicações em longo alcance. Entretanto, a antena se torna uma boa escolha para utilização de sistemas embarcados com base no protocolo de comunicação LoRaWAN®, visto que necessitam de otimização de energia e facilidade de implementação. As limitações da antena simulada baseiam-se no feixe unidirecional, o que prejudica para triangulação de sinais em LoRaWAN® ou GSM por exemplo, no entanto, permite futuras adaptações, através de arranjos para aumento do alcance ou truncamentos, para tornar a antena mais próximo da situação omnidirecional.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES, CNPq, UFRSA, GEPEAT e à equipe de laboratório de micro-ondas da UFRSA.

REFERÊNCIAS

- [1] Evans, Dave, "The Internet of Things. How the next evolution of the internet is changing everything" Cisco IBSG, pp. 2-5, Abril 2011.
- [2] L. Lizzi, F. Ferrero, P. Monin, C. Danchesi and S. Boudaud, "Design of miniature antennas for IoT applications," 2016 IEEE Sixth International Conference on Communications and Electronics (ICCE), 2016, pp. 234-237.
- [3] Logique. "As conexões geradas pela IoT". <https://www.logiquesistemas.com.br/blog/iot-na-industria-4-0/>. Acessado em Maio 2021.
- [4] K. V. S. S. S. Sairam, N. Gunasekaran and S. R. Redd, "Bluetooth in wireless communication," in IEEE Communications Magazine, vol. 40, no. 6, pp. 90-96, June 2002.
- [5] U. Noreen, A. Bounceur and L. Clavier, "A study of LoRa low power and wide area network technology," 2017 International Conference on Advanced Technologies for Signal and Image Processing (ATSIP), 2017, pp. 1-6.
- [6] C. M. Ramya, M. Shanmugaraj and R. Prabakaran, "Study on ZigBee technology," 2011 3rd International Conference on Electronics Computer Technology, 2011, pp. 297-30.
- [7] M. Kavre, A. Gadekar and Y. Gadhadre, "Internet of Things (IoT): A Survey," 2019 IEEE Pune Section International Conference (PuneCon), 2019, pp. 1-6.
- [8] Semtech, "LoRa Modulation Basics," Application Note AN1200.22, Rev.2, May 2015, <https://www.frugalprototype.com/wp-content/uploads/2016/08/an1200.22.pdf>, acessado em Maio 2021.
- [9] LoRa Alliance, "LoRaWAN. What is it. A technical overview of LoRa and LoRaWAN" <https://lora-alliance.org/wp-content/uploads/2020/11/what-is-lorawan.pdf>, acessado em Maio 2021.
- [10] Proeminente. "Modelo de rede OSI". <https://www.proeminente.com.br/blog/post/mundo/modelo-rede-osi>. Acessado em Maio 2021.
- [11] Diário Oficial da União. "Resolução nº 1º de Novembro de 2018". https://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/48742503. Acessado em 22 Maio 2021.
- [12] Smart Kits. "Introdução a tecnologia LoRa". <https://blog.smartkits.com.br/introducao-a-tecnologia-lora/>. Acessado em Maio 2021.
- [13] Kosek, M. Natkaniec, L. Vollero and A. R. Pach, "An Analysis of Star Topology IEEE 802.11e Networks in the Presence of Hidden Nodes," 2008 International Conference on Information Networking, 2008, pp. 1-5.
- [14] C. A. Balanis, 3 Ed, Antenna Theory: Analysis and Design. New Jersey (USA): John Wiley & Sons, Inc., 2005.
- [15] Werfelli, Houda. "Design of Rectangular Microstrip Patch Antenna". 2nd International Conference on Advanced Technologies for Signal and Image Processing, Monastir, Tunisia, Mar. 2016.
- [16] Geetech. "LoRa Shield". http://www.geetech.com/wiki/index.php/Lora_Shield. Acessado em Maio 2021.
- [17] ROGERS Corporation, "RT/duroid 6006/6010LM" <https://www.rogerscorp.com/-/media/project/rogerscorp/documents/advanced-connectivity-solutions/english/data-sheets/rt-duroid-6006-6010lm-laminate-data-sheet.pdf>, acessado em Maio 2021.
- [18] Teleco, "Frequências no Brasil. Frequências utilizadas por serviços" https://www.teleco.com.br/freq_no_brasil.asp. Acessado em Maio 2021.
- [19] Y. Huang e K. Boyle, Kevin. Antennas: From Theory to Practice. New Delhi, India: John Wiley & Sons, 2008, vol 1.

- [20] R. A. O. Silva. "Aplicação de Técnicas de Alargamento de Banda em Antenas de Microfita," M. Eng. tese, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil, Abr. 2014.
- [21] M. Ramesh e K. B. Yip, "Design Inset Fed Microstrip Patch Antenna," Journal of Microwaves and Optoelectronics, vol. 3, pp. 5-10, Dec. 2003.
- [22] D. M. Pozar. Engenharia de microondas. 4 ed., Estados Unidos da América: John Wiley & Sons. p. 756. 2012.
- [23] Fmuser. "O que é VSWR e como medir VSWR". <https://pt.fmuser.net/content/?2220.html#:~:text=VSWR%20%C3%A9%20uma%20medida%20de%20um%20linha%20de%20transmiss%C3%A3o>. Acessado em Maio 2021.
- [24] Silva, André. "Novas Técnicas de Otimização de Casamento de Impedância de Antenas Planares para Sistemas de Comunicação Sem Fio". Tese doutorado, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Natal, Brasil, Maio, 2019.
- [25] The Things Network. "Building a global open LoRaWAN Network". <https://www.thethingsnetwork.org/>. Acessado em Maio 2021.