

PROJETO E SIMULAÇÃO DE ANTENAS HELICOIDAIS COMPACTAS PARA APLICAÇÕES EM RF

Felipe Gerha Barbosa Otaviano da Silva aluno (IC) e Fábio Jesus Moreira de Almeida (Orientador)

Apoio: PIBIC Mackenzie

RESUMO

Antenas são dispositivos muito eficientes na detecção de ondas propagadas, essenciais no contexto atual de Indústria 4.0 e IoT (Internet das Coisas). Na faixa de 2.4 a 5.8 GHz, é possível detectar radiações de micro-ondas, por exemplo, muito presente neste novo contexto das telecomunicações. No presente trabalho, foram simuladas antenas compactas de 5,5mm de comprimento, para a finalidade de encontrar quais são os melhores para a sua fabricação, como por exemplo, o seu material, a fim de evitar-se desperdícios com experimentos malsucedidos. Até o presente momento, antenas helicoidais foram utilizadas para aplicações humanas, para detectar diferentes frequências no sangue com o intuito de identificar doenças a fim de monitorar o estado de saúde dos pacientes, aplicações em torres, para as telecomunicações em geral, entre outras. Neste trabalho, foram desenvolvidas, em software, a antena helicoidal de dipolo duplo, que de maneira preditiva, pode detectar frequências na faixa de 2.4 a 5.8 GHz, e por isso foi simulada, a fim de obter-se todos os resultados necessários, como o campo elétrico, magnético e suas derivadas direcionais, seu padrão de radiação e suas possíveis perdas. As simulações da nova antena se mostraram similares às existentes na literatura, porém com um custo reduzido, devido a utilização de materiais mais baratos como o cobre e o alumínio. Futuramente, ela será fabricada e utilizada em diversos projetos.

Palavras-chave: Antenas helicoidais, simulação, compactação de antenas

ABSTRACT

Antennas are very efficient devices in detecting propagated waves, essential in the current context of Industry 4.0 and IoT (Internet of Things). In the band from 2.4 to 5.8 GHz, it is possible to detect microwave radiation, for example, very present in this new context of telecommunications. In the present work, compact antennas of 5.5 mm in length were simulated, in order to find which are the best for their manufacture, such as their material, in order to avoid waste with unsuccessful experiments. So far, helical antennas have been used for human applications, to detect different frequencies in the blood in order to identify diseases in order to monitor the health status of patients, applications in towers, for telecommunications in general, among others. In this work, a double dipole helical antenna was developed in software, which, in a predictive way, can detect frequencies in the range of 2.4 to 5.8 GHz, and therefore it was simulated in order to obtain all the necessary results, such as the electric, magnetic field and their directional derivatives, their radiation pattern and their possible losses. The simulations of the new antenna were similar to those in the literature, but with a reduced cost, due to the use of cheaper materials such as copper and aluminum. In the future, it will be manufactured and used in several projects.

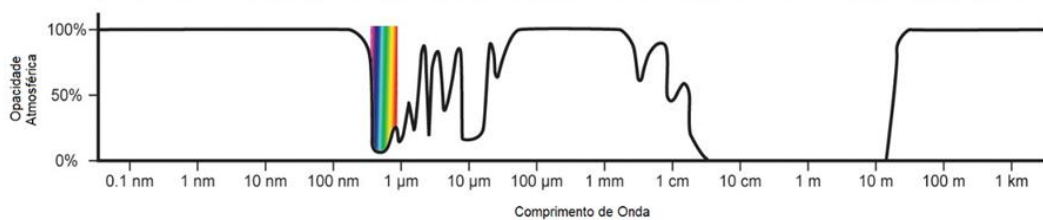
Keywords: Helical antennas, simulation, antenna compression

1. INTRODUÇÃO

Antenas são dispositivos que permitem a transmissão e recepção de radiação eletromagnética e são essenciais para as comunicações sem fio (HUITEMA, 2014). No contexto atual as antenas estão presentes e são fundamentais em nossos cotidianos, permitindo as comunicações sem fio que avançam cada vez mais com o conceito de internet das coisas (INTERNET, 2021), no qual qualquer objeto pode estar conectado à internet e até em roupas ou implantadas no corpo humano, monitorando, por exemplo, os sinais vitais de uma pessoa e transmitindo informações em tempo real (HUITEMA, 2014). Além disso, as antenas podem ser utilizadas também para a recepção de energia elétrica para a alimentação de pequenos dispositivos, como demonstrado por Ho *et al.* (HO, 2013) e Xu *et al.* (XU, 2014) para a alimentação de dispositivos implantáveis, como marcapassos no corpo humano.

As antenas operam em frequências inversamente proporcionais às suas dimensões físicas (BALANIS, 2008), uma antena dipolo de $\lambda/2$, por exemplo, onde λ é o comprimento de onda da radiação eletromagnética, operando em uma frequência de ressonância de 1 GHz teria um comprimento de 15 cm, dado o comprimento da onda de 30 cm de acordo com a clássica equação que relaciona o comprimento de onda, a frequência e a velocidade da luz. Esta característica fundamental impõe um desafio no desenvolvimento de antenas mais compactas e com foco em aplicações integradas em dispositivos móveis compactos ou em dispositivos implantáveis (KARNAUSHENKO, 2015). Uma possível solução para o desenvolvimento de antenas menores é a utilização de frequências eletromagnéticas maiores (comprimentos de ondas menores), o que possibilita reduzir o tamanho físico da antena, porém as ondas com maiores frequências possuem menor capacidade de penetração em objetos sólidos e podem sofrer maiores atenuações em tecidos humanos e na própria atmosfera, como mostrado na Figura 1, abaixo.

Figura 1 - Opacidade atmosférica em função do comprimento de onda



Fonte - Modificado de (ATMOSPHERIC, 2007).

Observa-se que para comprimentos de ondas na ordem de 1 cm, por exemplo, o que corresponde a uma frequência de 30 GHz, a opacidade atmosférica chega a aproximadamente 50%, por isso é mais comum a utilização de ondas de rádio na faixa de KHz, MHz e poucos GHz para as comunicações sem fio.

Para contornar a limitação imposta pela relação entre a frequência de operação e o tamanho físico da antena são utilizadas algumas técnicas no projeto e fabricação destas, como a utilização de materiais de alta permissividade elétrica em torno da antena e geometrias que aumentam o tamanho elétrico da antena e que possibilitam a redução do tamanho físico para escalas bem menores que o tamanho do comprimento da onda (BALANIS, 2008), (HUITEMA, 2014). Um exemplo são as antenas helicoidais utilizadas em dispositivos de comunicações móveis por rádio, como demonstrado na Figura 2, uma antena operando em 477 MHz ($\lambda=62,9$ cm) mas com comprimento de apenas alguns centímetros.

Figura 2 - Antena helicoidal utilizada em um dispositivo móvel operando em UHF (477 MHz).



Fonte - (UHF, 2008).

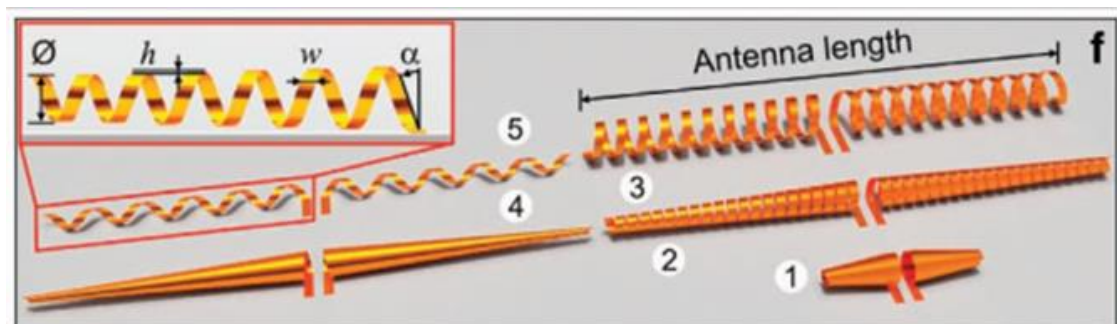
Antenas helicoidais para faixa de 5,8 GHz menores que 5 mm em comprimento e 0,2 mm em diâmetro já foram demonstradas na literatura e utilizando um material dielétrico de alta permissividade, o que reduz o comprimento de onda efetivo próximo à antena, essa faixa de operação foi reduzida para banda 2,4 GHz (KARNAUSHENKO,

2015). Esse tipo de antena possui potencial para aplicações em dispositivos implantáveis para comunicação e será utilizada como modelo inicial para os estudos deste projeto, que focará no projeto e simulação de antenas helicoidais compactas para comunicações na faixa de GHz.

1.1. Problema de pesquisa

As antenas possuem uma relação entre seu comprimento de onda de operação e seu tamanho físico que dificulta a miniaturização de dispositivos sem fio. Através do projeto e dos materiais utilizados na fabricação da antena é possível reduzir o seu tamanho físico, contudo uma série de parâmetros precisam ser definidos e a influência de cada um na eficiência da antena devem ser cuidadosamente avaliados a fim de se obter uma antena com eficiência otimizada de radiação e transmissão/recepção de dados, realizando perdas reduzidas através da otimização da condutividade da antena, da utilização de dielétricos de baixa perda e alta permissividade elétrica e do casamento da impedância com a fonte de alimentação e linha de transmissão. A própria antena helicoidal a ser estudada possui diversos parâmetros que podem ser ajustados, como mostrado na figura 3, como o diâmetro, comprimento, espessura e distância entre as hélices e grau de inclinação da espira. O que torna relevante a criação de um modelo computacional para estudo e desenvolvimento destes tipos de antenas, que são fabricadas através de técnicas de auto enrolamento por tensão em hetero-estruturas de polímeros e metais, possibilitando a fabricação de dispositivos em larga escala e com diferentes parâmetros de dimensões e formatos (GRIMM, 2013). Na Figura 3, está um exemplo de uma antena helicoidal proposta por KARNAUSHENKO *et al* (2015).

Figura 3 - Exemplo de antenas helicoidais utilizadas para comunicações na faixa de 2,4 e 5,8 GHz.



Fonte – (KARNAUSHENKO *et al*, 2015).

1.2. Justificativa

A expansão das comunicações sem fio em aparelhos integrados (internet das coisas) ao limite de dispositivos implantáveis para comunicações requer a aplicação de antenas compactas e com grande eficiência energética. As técnicas para redução dessas dimensões físicas dependem de diversos parâmetros quando se chega a tais limites, sendo relevante a criação de um modelo para o projeto das antenas e investigação dos efeitos da variação de cada parâmetro na eficiência da antena.

Há um outro ponto que deve ser considerado ao fazer este projeto: a economia de custos e materiais que a simulação nos proporciona, já que é possível manipular vários parâmetros sem muitas dificuldades, somente bastando configurar alguns valores do software além de que na simulação, é possível simular diferentes materiais.

1.3 Objetivos

O objetivo deste projeto é o estudo e desenvolvimento de antenas compactas através de simulações numéricas na ferramenta COMSOL MULTIPHYSICS para operação na faixa de GHz, com diferentes materiais, cobre e alumínio.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

O desenvolvimento de antenas compactas é uma área da engenharia de grande relevância para o desenvolvimento de dispositivos sem fio, contudo a miniaturização das antenas é um desafio já que a redução das dimensões físicas acaba resultando em uma inevitável redução da eficiência e largura de banda (HUITEMA, 2014). Essa redução de largura de banda impõe um desafio para sintonizar a antena através de seu projeto e especificações físicas, mas através de um desenvolvimento projetual é possível otimizar antenas para aplicações específicas com o compromisso entre eficiência e largura de banda.

MENDES *et al.* demonstraram uma antena auto montável em 3D para dispositivos implantáveis, mas não houve otimização para operação em frequências mais baixas, apresentando uma ressonância de centenas de GHz, com eficiência na ordem de -20 dB na faixa de 5 GHz para transmissão de energia.

Antenas helicoidais compactas, na ordem de mm, foram demonstradas por KARNAUSHENKO *et al* (2015) utilizando uma técnica de auto-enrolamento de fitas de metal para formar as antenas. Esta técnica de fabricação foi demonstrada por Grimm *et al.* e consiste na deposição de filmes metálicos sobre os quais é depositada uma camada polimérica sobre tensão mecânica, ao permitir o relaxamento desta montagem o efeito é o enrolamento do metal em uma espira, dependendo do formato e ângulo de

deposição das fitas metálicas no substrato há a formação de hélices (GRIMM, 2013), (KARNAUSHENKO, 2015).

KARNAUSHENKO *et al* (2015) demonstrou que com essa técnica foi possível criar uma antena, semelhante à mostrada na figura 3, com comprimento total de 5,5 mm, com casamento de impedância de 50 Ω e ressonância de 5,8 GHz em espaço livre e de 2,4 GHz envolvida em um polímero com permissividade relativa de 3,88. O ganho reportado da antena foi de -46 dB, o que de acordo com a sensibilidade da detecção permitiu comunicação até 2 m de distância (KARNAUSHENKO, 2015).

Espera-se que explorando a otimização dos parâmetros da antena, da linha de transmissão e casamento de impedâncias e do uso de dielétricos com maior permissividade elétrica a eficiência deste tipo de antena possa ser melhorada, como por exemplo, em suas frequências e em seu comprimento de onda.

3. METODOLOGIA

3.1. Aprendizado do software

No começo desta pesquisa, foi necessário o aprendizado da ferramenta COMSOL MULTIPHYSICS por parte do aluno, para que sua utilização fosse possível. Este processo de aprendizado foi composto por cinco aulas, nas quais, o aluno aprendeu tudo o que a ferramenta poderia oferecer, sendo o mais importante, a construção da geometria, a implementação de materiais, a configuração das físicas disponíveis pela ferramenta e a construção das malhas baseadas nas mesmas, e por fim, sobre a demonstração de resultados, por meio de gráficos, imagens etc. Finalizado todo o processo de aprendizado da ferramenta por parte do aluno, iniciaram-se as pesquisas para a simulação de antenas.

3.2. Modelo inicial de antena

A fim de compreender como a física do software funciona para as antenas, o modelo utilizado para o estudo inicial foi referente a uma antena de dipolo em formato cilíndrico, disponibilizado pela ferramenta. Este modelo consiste em duas hastes, as quais possuíam um ponto de alimentação entre elas.

Para começar, uma série de parâmetros foi definida, como o raio da espessura da antena, bem como o comprimento de cada uma de suas hastes. No caso específico desta antena, o comprimento de onda é definido por quatro vezes o comprimento de uma das hastes da antena, e com este último parâmetro definido, obteve-se a frequência da antena, a partir da equação que relaciona a frequência, o comprimento

de onda e a velocidade da luz. Na Tabela 1, pode-se verificar todos os parâmetros utilizados na construção desta primeira antena.

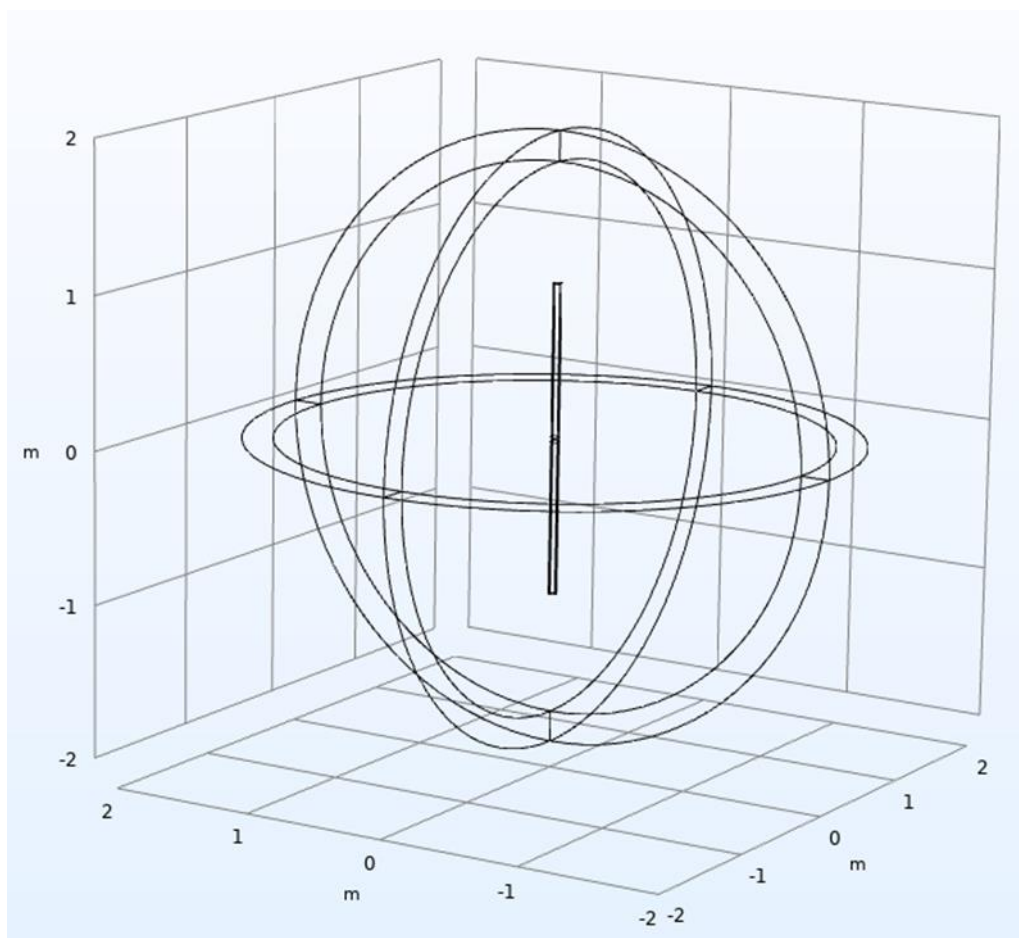
Tabela 1 – Parâmetros da antena dipolo no cilindro

Parâmetro	Valor
Largura de uma das hastes da antena (m)	1
Raio da espessura da antena (m)	0,03
Comprimento de onda (m)	4
Frequência (MHz)	75

Fonte – Elaborado pelo autor baseado no conteúdo disponível pela ferramenta COMSOL MULTIPHYSICS.

Estes parâmetros presentes na Tabela 1 serão utilizados pelo software na construção da antena cilíndrica. Logo após de definir estes parâmetros, o modelo inicial da antena com sua geometria está pronto. Também foi definido o espaço pelo qual o comprimento de onda irá passar, por meio uma esfera com o diâmetro deste último parâmetro citado. Na Figura 4, pode-se ver o resultado geométrico obtido.

Figura 4 – Modelo de antena dipolo cilíndrica



Fonte – Elaborado pelo autor baseado no conteúdo disponível pela ferramenta COMSOL MULTIPHYSICS

Na Figura 4, pode-se ver a geometria da antena cilíndrica, e o campo de sua propagação representado pela esfera, a qual, possui o diâmetro igual ao seu comprimento de onda.

Após determinar toda a geometria, define-se o meio no qual a antena estava presente e o material do qual ela era feita. Esta parte será importante para toda a implementação da física, pois grande parte dos parâmetros utilizados na solução dos problemas resolvidos pela ferramenta, via equações pertencentes a cada física presente nela, virão de propriedades, como permissividade e condutividade dos materiais. Nesta determinação da física, que em sua maior parte já veio configurada na ferramenta, basta precisando ajustar as condições de impedância do material, todas as condições de espalhamento e propagação das ondas e a impedância e tensão do ponto de alimentação, 50Ω e $1V$, respectivamente. Assim, foi possível definir a malha física e todas as configurações para o software realizar o estudo. Por fim, obteve-se as imagens referentes ao campo elétrico, em V/m , do formato dos campos,

tanto em 2D quanto em 3D, das perdas resistivas pela superfície da antena, a direção dos campos e da impedância do ponto de alimentação.

Todo este processo relatado até agora, foi grande parte da base para a construção do modelo desta iniciação científica, com suas devidas adaptações, e o resultados do mesmo serão apresentados na secção de resultado e discussão.

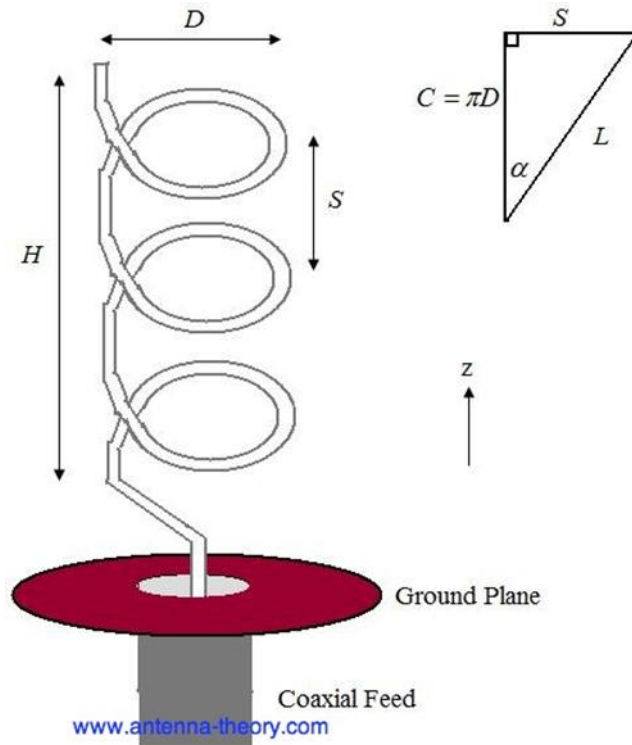
3.3 Modelo definitivo da antena

Após o modelo inicial ser estudado e revisado, aplicamos este modelo de estudo para a geometria helicoidal proposta neste trabalho. O primeiro ponto a ser visto foi o da geometria da antena, a qual, foi baseada no modelo proposto por KARNAUSHENKO *et al* (2015).

A partir de dados coletados deste modelo proposto, houve uma pesquisa em torno das antenas helicoidais em geral, pois estes dados fornecidos pelo seu trabalho, não eram suficientes para colocar dentro da geometria fornecida pela ferramenta COMSOL MULTIPHYSICS, já que eram necessários mais dados para a construção da geometria dentro dela.

Portanto, a partir de algumas equações do formato helicoidal, como demonstrado na Figura 5, define-se os parâmetros necessários para trabalhar na ferramenta.

Figura 5 – Modelo base para a construção de antenas helicoidais



Fonte – ANTENNA-THEORY, 2011

De acordo com a Figura 5, H é a altura desejada para cada uma das hastes helicoidais, D é diâmetro interno do helicoidal, α o ângulo de inclinação do formato helicoidal, S a separação das espiras da antena em torno do seu eixo. Outros parâmetros importantes a serem comentados, são: C a circunferência entre as espiras da antena, L , o comprimento total do helicoidal esticado - apesar deste último não ter sido necessário na construção do helicoidal dentro da ferramenta - e o número de espiras deste formato helicoidal, sendo a divisão da altura pela separação vertical entre essas espiras (ANTENNA-THEORY, 2011). Como pode-se ver na Figura 5, a maioria destes parâmetros podem ser obtidos por relações trigonométricas demonstradas na mesma. Com base nos parâmetros geométricos definidos por este formato, definiu-se todos os seus valores, como pode-se observar na Tabela 2 (muitos destes valores estão aproximados).

Tabela 2 – Parâmetros utilizados na antena helicoidal definitiva

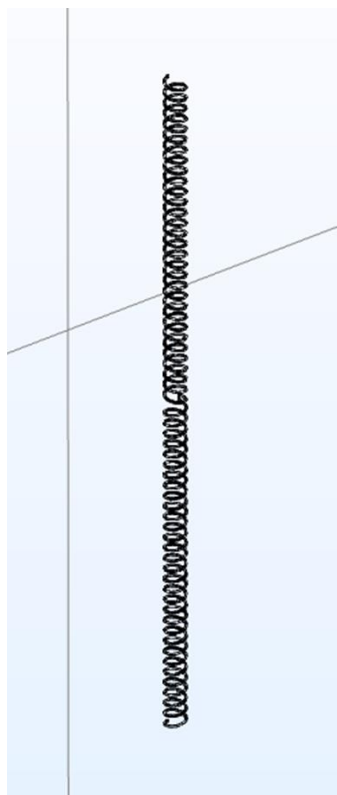
Parâmetros	Valor
Altura de um braço helicoidal (mm)	2,725
Diâmetro interno do helicoidal (μm)	160
Espessura do helicoidal (mm)	0,01
Ângulo de inclinação da espira ($^\circ$)	10
Circunferência entre as espiras (μm)	502,65
Separação vertical entre as espiras (μm)	88,632
Número de espiras	31

Fonte – Elaborada pelo autor, baseado em KARNAUSHENKO *et al* (2015)

Após toda a definição dos parâmetros, iniciou-se a construção do modelo geométrico da antena. Entre seus dois braços, há um vão de 0,1mm, e no meio deste vão, há o esquema de ligação para encaixar o ponto de alimentação.

Para que fosse possível essa conexão, foi feita uma extensão no começo de cada haste helicoidal com o comprimento de 0,025mm e uma conexão via um quarto de um toróide com o raio de 0,0125mm. Logo, a geometria da antena que operará na faixa de 2,4 a 5,8GHz, está pronta, e pode ser verificada na Figura 6.

Figura 6 – Modelo geométrico da antena helicoidal



Fonte – Elaborada pelo autor

Na Figura 6, observa-se o formato geométrico final desta antena. Diferente do formato cilíndrico, o formato helicoidal possui suas próprias equações e parâmetros (ANTENNA-THEORY, 2011), que possibilitam maior eficiência na propagação de ondas, dentre outros parâmetros físicos.

Após a construção da geometria, repetiu-se todos os passos anteriores na construção, a fim de obter-se os resultados desejados. Utilizou-se o ar como o meio no qual a antena está imersa, e o material da antena. Na simulação, foi utilizado o alumínio, pois além de ser menos denso que outro metal, também tem sua permissividade elétrica abaixo de outros condutores como cobre, ferro, prata e ouro. Além de ser mais barato do que Titânio e Germânio que também são muito utilizados em Antenas. Para aplicações no sangue humano o Alumínio também apresenta baixa toxicidade como observa-se no artigo proposto por SHAW *et al* (2013).

4. RESULTADO E DISCUSSÃO

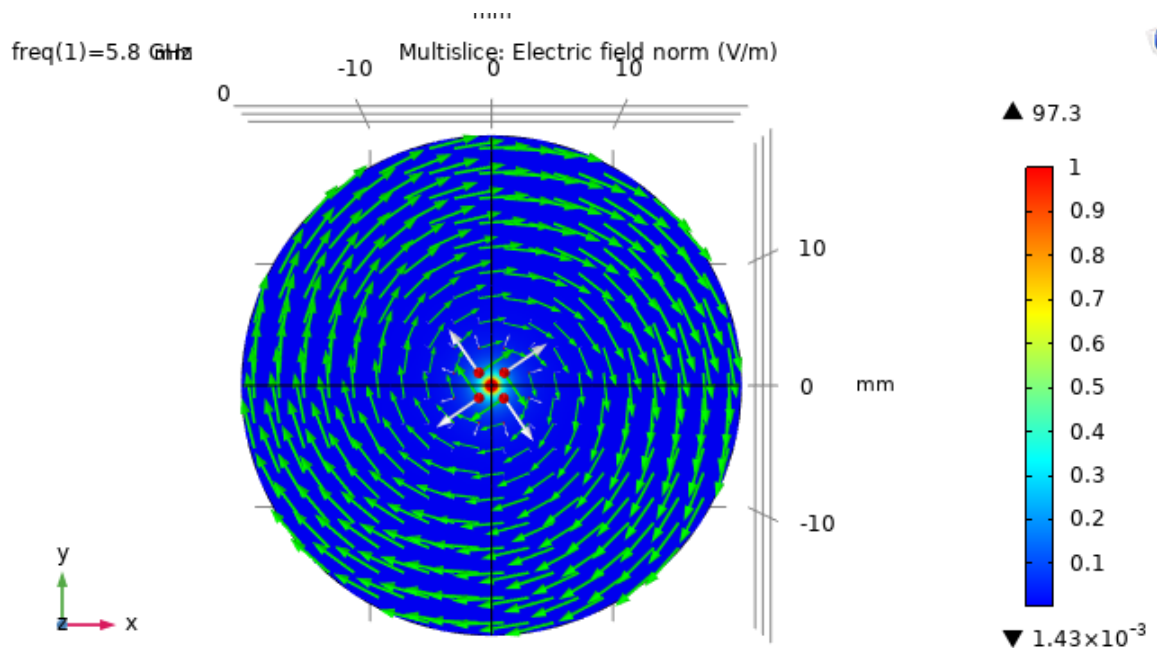
Foi identificada uma grande dificuldade de aproximar o modelo geométrico da antena com a proposta por KARNAUSHENKO *et al* (2015), pois algumas limitações geométricas da ferramenta impediram essa aproximação, sendo que o raio interno das hastes helicoidais, diminuía ao longo do eixo no modelo de KARNAUSHENKO *et al*

(2015), enquanto no modelo proposto neste trabalho, ele se mantém constante ao longo do eixo.

Esta dificuldade imposta pela geometria da ferramenta, proporciona dificuldades na simulação, principalmente para modelar as físicas, pois a malha que será gerada por ela, depende muito da geometria, além de haver dificuldades na hora de definir o ponto de alimentação.

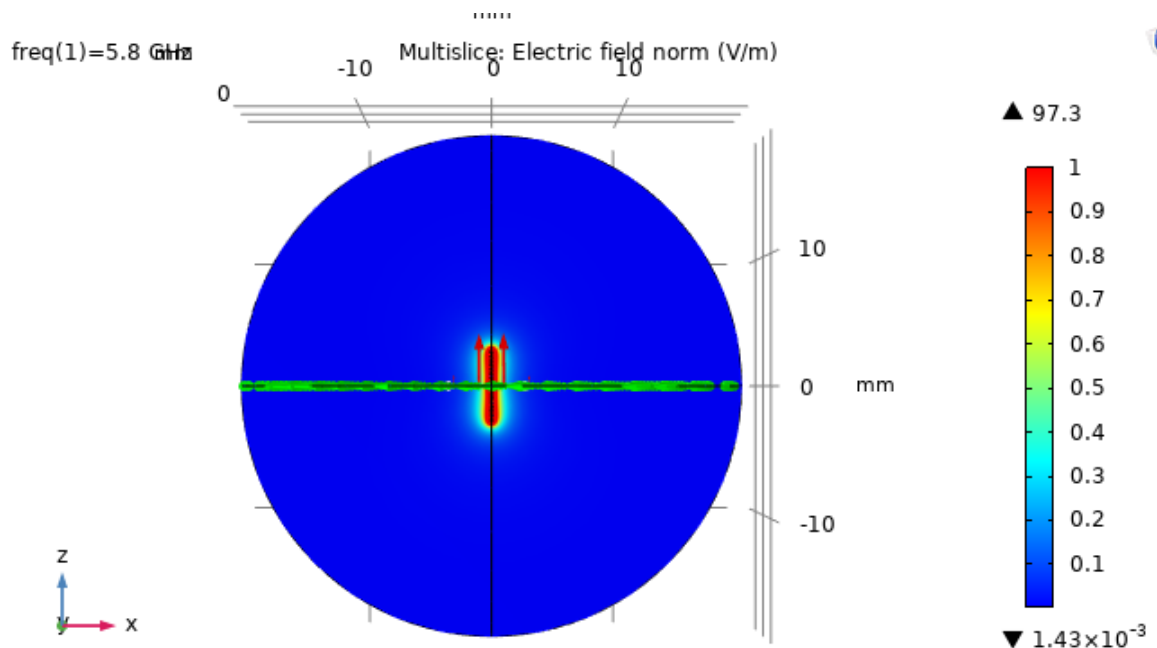
Os resultados gráficos que serão apresentados nas figuras que virão a seguir, são todos referentes ao alumínio. A Figura 7 e a Figura 8 traz o primeiro modelamento do Campo Elétrico e Magnético em 3D, com suas derivadas direcionais, juntamente com os Campos Magnéticos e o fluxo de potência da antena proposto nos objetivos. Para melhor visualização, a visão destes campos e de suas derivadas direcionais estão tanto no eixo xy, quanto no eixo xz.

Figura 7 – Diagrama do Campo Elétrico 3D, com os direcionais do campo elétrico, do campo magnético de do fluxo de potência da antena proposta no trabalho, também coa a impedância da alimentação. (Eixo xy)



Fonte – Elaborada por autor

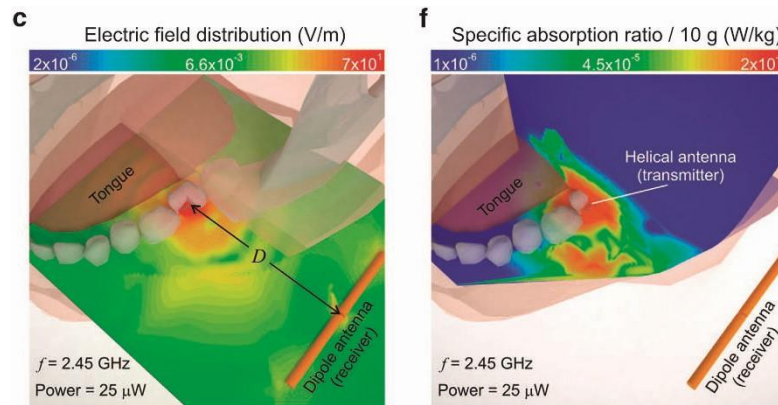
Figura 8 – Diagrama do Campo Elétrico 3D, com os direcionais do campo elétrico, do campo magnético e do fluxo de potência da antena proposta no trabalho, também com a impedância da alimentação. (Eixo xz)



Fonte – Elaborada por autor

Nestas figuras, é possível verificar o campo elétrico, em V/m, e todas as direções do campo elétrico (em vermelho), do campo magnético (em verde) e do fluxo de potência (em branco). Pode-se perceber que a excitação da onda é mais alta nas proximidades do ponto de alimentação e do final de cada haste da antena, batendo com o modelo proposto pelo COMSOL MULTIPHYSICS, e o fluxo de potência, segue de acordo com o proposto por MENDES *et al* (2012). Na Figura 9, há também a demonstração do campo elétrico feito por KARNAUSHENKO *et al* (2015), para comparar com o modelo deste trabalho.

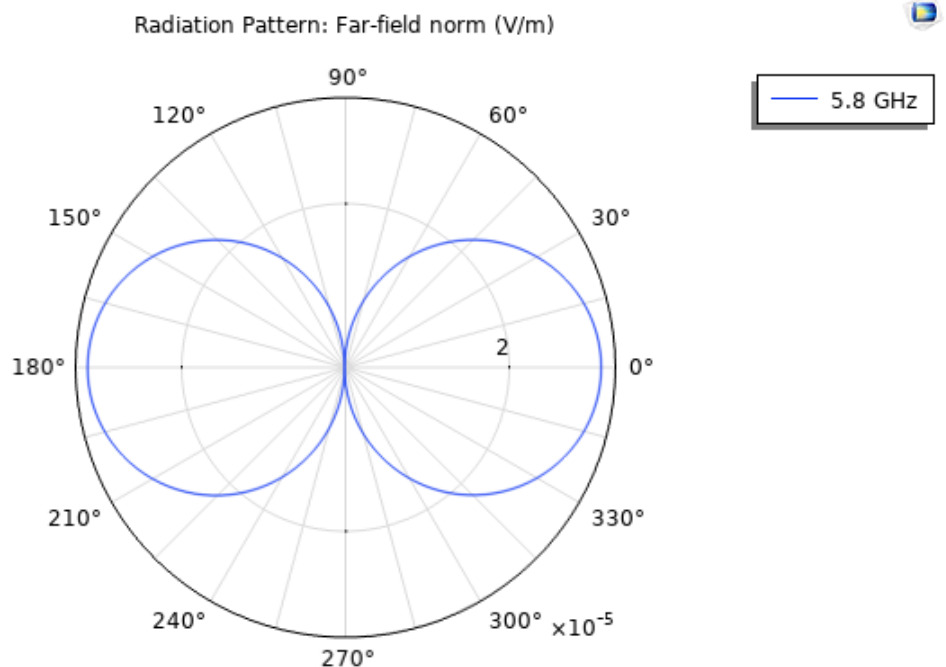
Figura 9 – Diagrama do campo elétrico em 3D proposto por KARNAUSHENKO *et al* (2015).



Fonte – KARNAUSHENKO *et al* (2015)

Comparando a Figura 8 com a Figura 9, é possível observar que o campo elétrico segue a mesma ordem de grandeza do resultado apresentado neste trabalho, de 10^{-3} , apesar dos meios em que elas estão imersas serem diferentes, no caso deste trabalho, o ar, e no de KARNAUSHENKO *et al* (2015), o sangue. Na Figura 10, pode-se observar o padrão de radiação em 2D, importante para observar o ganho da antenna.

Figura 10 – Padrão de radiação em 2D da antenna, demonstrando a sua polaridade, visto pela coordenada y do vetor normal.

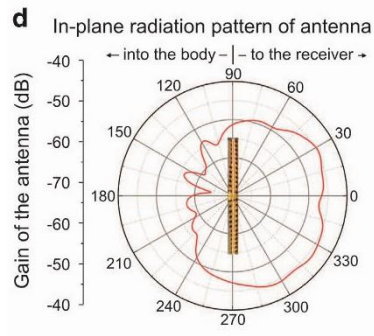


Fonte – Elaborada por autor

Pode-se também observar a polaridade do campo magnético, que além de confirmar a teoria de polaridade dela, o formato bate ainda com o modelo proposto pelo COMSOL MULTIPHYSICS, e sua grandeza de 10^{-5} , também está de acordo com

os resultados apresentados por KARNAUSHENKO *et al* (2015), como pode ser visto na Figura 11, apesar de sua visão estar diferente.

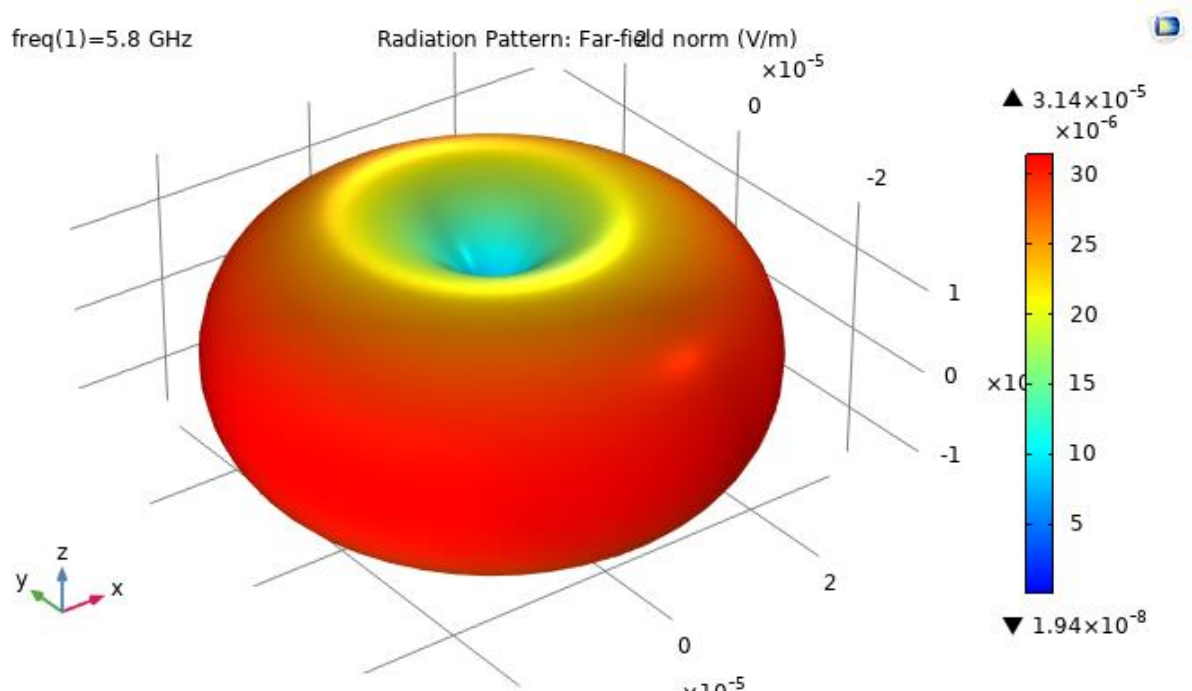
Figura 11 – Padrão de radiação em 2D da antenna, proposto por KARNAUSHENKO *et al* (2015).



Fonte – KARNAUSHENKO *et al* (2015)

Logo após os resultados anteriores serem obtidos, o padrão de radiação em 3D foi obtido. Na Figura 12, ele pode ser observado, batendo com o de uma antenna de verdade.

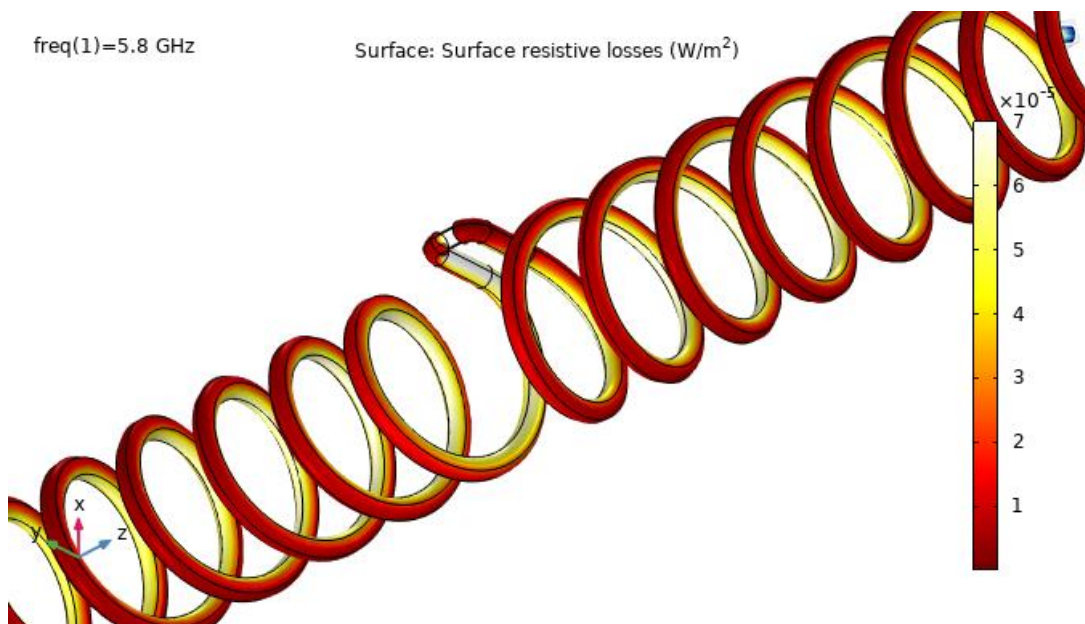
Figura 12 – Padrão de radiação em 3D da antenna deste projeto



Fonte – Elaborada por autor

GIL *et al* (2001), demonstrou o cálculo deste padrão de radiação e o formato do resultado está coerente com o apresentado na simulação. Por fim, a Figura 13 demonstra as perdas resistivas ao longo da superfície

Figura 13 – Perdas resistivas ao longo da superfície



Fonte – Elaborada pelo autor

Estas perdas estão mais no interno da geometria helicoidal da antena, batendo também com o modelo proposto pelo COMSOL, sendo essas perdas também mais próximas do ponto de alimentação. Estes resultados também servem para o cobre, que por conta de proximidades com os parâmetros de permissividade e condutividade, houve muita semelhança entre os dois.

Além disso, houve também uma série de outros parâmetros, obtidos pelo software e estes resultados foram muito parecidos entre o alumínio e o cobre, os quais serão apresentados nas considerações finais. Entretanto, a plotagem de alguns gráficos foi impossibilitada, como por exemplo, o de perdas por retorno, devido com alguns problemas relacionados com a memória RAM dos dispositivos utilizados.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na Tabela 3, é possível observar todos os parâmetros obtidos na simulação. Há uma semelhança entre os parâmetros do cobre e do alumínio, por isso, está se considerando os parâmetros obtidos por este último.

Tabela 3 – Parâmetros obtidos no software tanto para o alumínio, quanto para o cobre

Parâmetros	Valor
Frequência (GHz)	5,8
S11	-0,01739
Impedância do ponto de alimentação (Ω)	$(7512,9 - 6,1968i) \cdot 10^{-5}$
θ ($^\circ$)	90
φ ($^\circ$)	272
Direção	1,5096
Direção (dB)	1,7887
Potência do campo elétrico (μW)	32

Fonte – Elaborada pelo autor

Estes parâmetros se mostraram bem coerentes, e a partir deles, decidiu-se utilizar o alumínio, pelos motivos que foram apresentados na seção 3 deste trabalho. O Cobre também pode ser utilizado, apesar de ser menos eficiente do que o alumínio em algumas aplicações, principalmente, dentro do corpo humano.

O COMSOL MULTIPHYSICS provou ser uma ferramenta eficiente na elaboração de soluções para problemas físicos. No caso deste trabalho de iniciação científica, a simulação auxiliou bastante quanto a evitar os desperdícios de materiais decorrentes das experiências físicas fracassadas ou menos eficientes comparadas a outras, já que quando ocorrem erros, é possível revertê-los antes mesmo de partir para a parte física, além de ser possível realizar testes com diferentes materiais e valores de parâmetros físicos, por exemplo.

Entretanto, houve alguns problemas enfrentados no estudo desta antena. Como o COMSOL é uma ferramenta de simulação física, ou seja, todas as físicas possíveis estão presentes nele, o usuário precisa configurar todas aquelas que ele deseja utilizar, o que pode ser bastante trabalhoso em muitos casos, como foi no desta iniciação, fora que este fator torna a ferramenta muito pesada na hora de trabalhar e rodar os resultados. Fora os problemas de modelagem da geometria, da apresentação de gráficos etc.

Apesar de todas as adversidades enfrentadas, vários resultados foram devidamente apresentados, e esta antena pode ter várias aplicações. Em futuros projetos, será possível a fabricação desta antena e a aplicação em outras pesquisas.

6. REFERÊNCIAS

ANACLETO P., MENDES P. M., GULTEPE E. E GRACIAS D. H. 3D Small Antenna for Energy Harvesting Applications on Implantable Micro-devices. Loughborough Antennas & Propagation Conference, IEEE, Loughborough UK, 2012.

ATMOSPHERIC electromagnetic transmittance or opacity, *In*: WIKIMEDIA COMMONS: o repositório de mídias livre. [São Francisco, CA: Fundação Wikimedia], 2007, Disponível em: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Atmospheric_electromagnetic_transmittance_or_opacity.jpg, Acesso em: 20 abr. 2021.

BALANIS, C. A., **Teoria de Antenas – Análise e Síntese Vol. 1**, 3. ed., Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2008, 340 p.

GIL F., CLARO A. R., FERREIRA J. M., PARDELINHA C. and L. M. Correia, "A 3D interpolation method for base-station-antenna radiation patterns," in IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol. 43, no. 2, pp. 132-137, 2001.

GRIMM D. *et al.* Rolled-up nanomembranes as compact 3D architectures for field effect transistors and fluidic sensing applications. **Nano Letters**, vol. 13, 213-218, 2013.

HELICAL ANTENNAS (HELIX) – ANTENNA THEORY. The Antenna Theory Website, 2009-2011. Disponível em: < <https://www.antenna-theory.com/antennas/travelling/helix.php> >. Acesso em: 01 nov. 2021.

HO J., S. KIM, A. Poon Midfield Wireless Powering for Implantable Systems. **Proceedings of the IEEE**, vol. 101, no. 6, pp. 1369–1378, 2013.

HUITEMA L E MONEDIERE T. **Progress in Compact Antennas**, BoD – Books on Demand, 2014.

INTERNET das coisas, *In*: WIKIPÉDIA: a enciclopédia livre. [São Francisco, CA: Fundação Wikimedia], 2021. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Internet_das_coisas, Acesso em: 20 abr. 2021.

KARNAUSHENKO D, KARNAUSHENKO D, MAKAROV D., SCHMIDT D. Compact helical antenna for smart implant applications, **NPG Asia Materials**, vol. 7, 2015.

SHAW, C.A., TOMLJENOVIC, L. Aluminum in the central nervous system (CNS): toxicity in humans and animals, vaccine adjuvants, and autoimmunity. *Immunol Res* 56, 304–316, 2013.

UHF CB with rubber ducky exposed, *In*: WIKIMEDIA COMMONS: o repositório de mídias livre. [São Francisco, CA: Fundação Wikimedia], 2008, Disponível em: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:UHF_CB_with_rubber_ducky_exposed.jpg, Acesso em: 20 abr. 2021.

XU Q, X. GAO, H. WANG, J. HE, Z. MAO, M. SUN, Batteries Not Included: A Mat-Based Wireless Power Transfer System for Implantable Medical Devices As a Moving Target, **IEEE Microwave Magazine**, vol. 14, no. 2, pp. 63–72, 2013.

Contatos: felipebip1234@gmail.com e fabio.almeida@mackenzie.br