



**UNIVERSIDADE DO SUL DE SANTA CATARINA**

**JARDEL COSTA MARTINS**

**SIMULAÇÃO E CONSTRUÇÃO DE UM PAR DE ANTENAS HELICOIDAIS  
PARA USO NAS AULAS DE ONDAS E ANTENAS**

**Tubarão**

**2020**

**JARDEL COSTA MARTINS**

**SIMULAÇÃO E CONSTRUÇÃO DE UM PAR DE ANTENAS HELICOIDAIS  
PARA USO NAS AULAS DE ONDAS E ANTENAS**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da  
Universidade do Sul de Santa Catarina como  
requisito parcial à obtenção do título de  
Engenheiro Eletricista.

Orientador: Bruno William Wisintainer, Ms

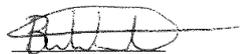
**Tubarão**  
**2020**

**JARDEL COSTA MARTINS**

**SIMULAÇÃO E CONSTRUÇÃO DE UM PAR DE ANTENAS HELICOIDAIS  
PARA USO NAS AULAS DE ONDAS E ANTENAS**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado à obtenção do título de Engenheiro Eletricista e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Elétrica da Universidade do Sul de Santa Catarina.

Tubarão, 08 de dezembro de 2020.



Professor e orientador Bruno William Wisintainer, Ms  
Universidade do Sul de Santa Catarina



---

Professor Luís Fernando Ferreira de Campos, Ms  
Universidade do Sul de Santa Catarina



Professora Silvana Madeira Alves Dal-Bó, Ms  
Universidade do Sul de Santa Catarina

Dedico a minha família e minha namorada  
Caroline que sempre me apoiaram.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao Professor Bruno William Wisintainer por aceitar o desafio de me orientar e tirar muitas das minhas dúvidas, e também por ser um ótimo professor por quem sempre admirei.

Aos meus amigos Luiz Nazário, Giovani P. Pamato Junior, José Pedro Almeida Pamato e Elvis Haron Alves de Freitas por me apoiarem e auxiliarem com o projeto.

Ao professor Luís Fernando Ferreira de Campos e Coordenador Francisco Duarte de Oliveira, por me auxiliarem com arduinos e equipamentos.

Ao professor Roger por tirar dúvidas sobre o conteúdo.

Agradeço minha namorada Caroline Nazário por me ajudar a revisar o trabalho, mas principalmente por estar na minha vida, como melhor amiga e companheira.

Por fim, agradeço aos meus familiares, amigos, colegas e professores por todo o incentivo nessa longa jornada acadêmica.

“A vida é uma peça de teatro que não permite ensaios. Por isso, cante, chore, dance, ria e viva intensamente, antes que a cortina se feche e a peça termine sem aplausos.”

Charlie Chaplin

## RESUMO

O objetivo desse projeto é desenvolver antenas helicoidais, modelo de antena axial, para realização de simulações. O modelo da antena helicoidal é projetado para a frequência utilizada no projeto, logo este pode emitir e receber os dados. As antenas helicoidais são construídas de forma manual e têm o objetivo de serem utilizadas em simulações. Pré-definindo frequência, número de voltas e espessura do fio pode-se definir o diâmetro da hélice, comprimento de onda e também os ganhos em decibel, para assim, com auxílio da equação de Friis, definir o enlace entre as antenas.

Palavras-chave: Antenas, Equação de Friis, Simulação.

## **ABSTRACT**

The main idea of this project is to develop helical antennas, an axial antenna model, for conducting simulations. The helical antenna model is designed for the frequency used in the project, so it can send and receive data. Helical antennas are built manually and aims to evaluate all tests. By pre-defining frequency, number of turns and the thickness of the wire, it is possible to define the helix diameter, wavelength and also the decibel gains, so with the help of Friis equation to define the link between the antennas.

Keywords: Antennas, Friis equation, Simulation.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Polarização circular.....	16
Figura 2 - <i>Software</i> para cálculo da antena.....	18
Figura 3 - Arduino IDE .....	19
Figura 4 - Modos de radiação: (a) Omnidirecional e (b) Axial .....	20
Figura 5 - Antena helicoidal e seus parâmetros.....	20
Figura 6 - Enlace de duas antenas .....	24
Figura 7 - Propagação das ondas (Zonas de Fresnel) .....	26
Figura 8 - Conexão entre o Arduino e o NRF24L01 .....	28
Figura 9 - Arduino Uno .....	29
Figura 10 - NRF24L01 2,4 GHz com antena .....	31
Figura 11 – Paquímetro para medições para o enrolamento dos cabos.....	33
Figura 12 - Contornando os cabos conforme a polarização circular .....	34
Figura 13 - Isolamentos dos cabos. ....	34
Figura 14 - Antenas pré-prontas para uso.....	35
Figura 15 - Antena concluída .....	36
Figura 16 - Testes de antenas com distância de 10 metros.....	38
Figura 17 - Monitor serial do Arduino IDE.....	39
Figura 18 - Teste da antena.....	40
Figura 19 - Locais onde foram feitos os testes .....	41

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - <i>Datasheet</i> Arduino .....	30
Tabela 2 - <i>Datasheet</i> NRF24L01 2,4 GHz com .....	31

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>12</b>
1.1	JUSTIFICATIVA	12
1.2	OBJETIVOS	13
1.2.1	Objetivo Geral	13
1.2.2	Objetivos Específicos	13
1.3	METODOLOGIA	13
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	14
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>15</b>
2.1	ANTENAS	15
2.1.1	Antena Isotrópica	15
2.1.2	Antenas com polarização: RHCP e LHCP	16
2.2	SOFTWARE	17
2.2.1	Jcoppens	17
2.2.2	Software Arduino IDE (Ambiente de Desenvolvimento Integrado)	18
2.3	CÁLCULOS REFERENCIAIS	19
2.3.1	Equação para a criação da antena	19
2.3.2	Equação de Friis	23
2.3.3	Zona de Fresnel	26
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODO</b>	<b>28</b>
3.1	MICROCONTROLADORES	28
3.1.1	Arduino Uno	29
3.1.2	Módulo transceptor <i>wireless</i> NRF24L01 2,4 GHz com antena	30
3.2	MATERIAL PARA O DESENVOLVIMENTO DAS ANTENAS	32
3.2.1	Material utilizado	32
3.2.2	Criação da antena	32
3.3	PROGRAMAÇÃO	36
3.4	RESULTADO	37
<b>4</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>42</b>
	REFERÊNCIAS	43

## 1 INTRODUÇÃO

Antenas são dispositivos capazes de transformar energia eletromagnética guiada pela linha de transmissão em energia eletromagnética irradiada, também podendo ser utilizada na função reversa. Sendo assim, torna-se essencial para qualquer comunicação realizada por radiofrequência.

Uma das características mais comuns em antenas é irradiação feita com energia eletromagnética, sendo que há uma relação entre o emissor e o receptor e suas potências são proporcionais à equação de Friis. As antenas helicoidais, foco desse trabalho, são comuns em várias funcionalidades, na sociedade são usadas em transmissão de internet, rádio, telefonia, TV e para uso militares como satélites espaciais (OLIVEIRA, 2013).

As antenas helicoidais podem radiar de vários modos diferentes, como modo axial, omnidirecional e cônico. O axial é muito usado em comunicação direta, ou seja, ponto-a-ponto, o omnidirecional ocorre a circunferência da espiral é menor que a axial, e o modo cônico normalmente quando a circunferência da espiral é maior que o comprimento de onda (FUSCO, 2006).

Portanto, o propósito é criar um kit de antenas helicoidais que simulam o funcionamento de antenas em sala de aula. Por conseguinte, os alunos podem adquirir um conhecimento técnico sobre o conteúdo.

### 1.1 JUSTIFICATIVA

O projeto tem a finalidade de desenvolver um kit didático para que acadêmicos possam praticar e simular diversas situações de enlace simples, oferecendo assim mais conhecimento sobre o conteúdo de ondas e antenas. O kit representa o funcionamento do enlace em tempo real e, com apoio do *software* Arduino IDE realizar a conexão entre as duas antenas.

Os testes são realizados posicionando as duas antenas em locais diferentes para, assim, obter os dados produzidos pela mesma. Utiliza-se o *software* e *hardware* Arduino, por possuir valores mais acessíveis financeiramente e de conhecimento comum aos acadêmicos da Universidade.

Simulações em campo facilitam o aprendizado, fazendo com que os alunos aprendam de forma técnica e através da prática, até mesmo podendo motivá-los a se especializarem na área de antenas.

## 1.2 OBJETIVOS

O objetivo é criar um kit didático com a finalidade de oferecer uma nova alternativa ao aprendizado acerca do funcionamento das antenas helicoidais, adquirindo melhor conceito sobre o conteúdo.

### 1.2.1 Objetivo Geral

Projetar um kit didático para a disciplina de Ondas e Antenas e auxiliar o ensino e aprendizagem do funcionamento das antenas.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Adquirir mais conhecimento na área de ondas e antenas.
- Produzir um kit que facilite o aprendizado e proporcione uma maior compreensão do conteúdo, de maneira simples e objetiva.
- Avaliar a simulação por *software* Arduino IDE e conferir com o kit.
- Definir formas de trabalhar com as antenas helicoidais.
- Prática de um enlace simples.

## 1.3 METODOLOGIA

A metodologia utilizada é baseada em pesquisa experimental, onde foram coletados dados de simulação física. Para tanto, foi utilizado o Arduino IDE, que é um *software* para simulações de robótica e infinitas experiências (nesse caso, de enlace) oferecendo dados e comparando com uma simulação real, utilizando antenas feitas de forma manual para analisar os efeitos e realizar testes.

Ao utilizar o *software* Arduino IDE, é possível definir a distância na qual as antenas devem ser colocadas no simulador, oferecendo dados sobre sua eficácia e como podem ser utilizadas a fim de definir o enlace entre elas.

A simulação tende a oferecer um enlace simples com o propósito de mostrar o funcionamento técnico das antenas. O ensaio oferece testes para verificar se tudo que foi calculado realmente funciona.

A partir das características do módulo transceptor *wireless* NRF24L01, pode-se definir o diâmetro e o comprimento da hélice, extensão da onda e os ganhos em decibel (dB), a fim de definir a melhor forma de criá-la. Logo, com essas características, pode-se utilizar a equação de Friis para definir a potência recebida em dBi (decibel relacionado à antenas isotrópica) criada pelo enlace.

#### 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está dividido em 4 capítulos. No primeiro tem a introdução, onde é apresentado o projeto de manufatura e citado o objetivo principal do projeto.

No segundo capítulo, Revisão Bibliográfica, são feitos os cálculos de acordo com o modelo da antena e através destes resultados, é realizada a equação de Friis.

O terceiro capítulo é a criação das antenas e registro dos testes em diferentes locais para melhor desenvolver a mesma.

O quarto, e último capítulo nos apresenta a conclusão do trabalho, onde relata os fatores estabelecidos de acordo com estudos realizados durante o processo.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção são abordadas as principais topologias das antenas e também são discutidas as características de enlace da antena helicoidal, que foi escolhida para o desenvolvimento do projeto.

### 2.1 ANTENAS

A quantidade de modelos de antenas é extremamente gigante, porém cada uma delas é feita para tipos de adequações e necessidades específicas (FUSCO, 2006).

As antenas helicoidais são dispositivos construídos em forma de espiral ou hélice a partir de múltiplos condutores. São usadas para tipos de radiação circular polar que fazem a onda conduzir em formato de espiral.

Dentre as qualidades proporcionadas por este tipo de antena estão a impedância de entrada quase real e uma extensa largura de banda, fazendo com que o efeito de mudança na polarização do sinal não aconteça, ou seja, fazendo com que a interferência seja quase nula. (FUSCO, 2006)

Esse modelo opera com três tipos de operações: modo comum (omnidirecional), modo axial e modo cômico. As antenas helicoidais são muito usadas para rastreamento de satélites (direcionais) e em modelos de rádios. Também possuem cobertura quase hemisférica nas bandas de Frequência Ultra-Alta (UHF, do inglês *Ultra High Frequency*) e de micro-ondas (SLADE, 2015).

#### 2.1.1 Antena Isotrópica

Antenas são, frequentemente, referidas pelo tipo de diagrama que produzem. Uma antena isotrópica, que é hipotética, radia igualmente em todas as direções, produzindo um diagrama de radiação constante (STUTZMAN et al., 2012).

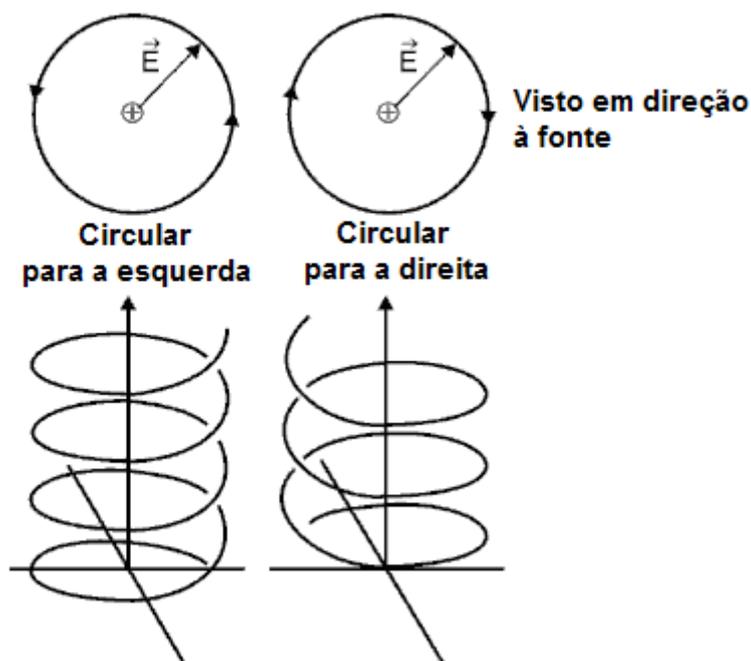
As antenas isotrópicas têm por função ser usada como comparativo entre as antenas reais e as ideais. No caso que o ganho de uma antena comum é medido em decibel, cuja sigla é em dB, e quando é o ganho da mesma é comparada com a antena isotrópica que é usada no mesmo local, a unidade é expressada em dBi.

### 2.1.2 Antenas com polarização: RHCP e LHCP

Uma das características mais interessantes deste tipo de antena é o seu formato. Não são retas como os modelos tradicionais de antenas e sim em formato de espiral. Sendo assim, o campo el é transmitida de forma circular, fazendo com que as antenas helicoidais sejam polarizadas circulares (CP).

Existem dois tipos de polarização. A primeira é a RHCP (antena polarizada com a mão direita, do inglês *Right Hand Circular Polarized*) que possui a característica de ser polarizada pela direita e a LHCP (antena polarizada com a mão esquerda, do inglês *Left Hand Circular Polarized*) que é conhecida como antena circular polarizada à esquerda. Como pode-se perceber, a sua diferença é o lado da polarização, conforme a Figura 1.

Figura 1 - Polarização circular



Fonte: site novacon.

Sendo assim, o mais adequado seria usar o mesmo modelo para o mesmo receptor e transmissor. Isso porque, a união entre polos circulares opostos causa grande interferência, se tornando 1000 vezes mais fraca que a antena. Isso significa que o intervalo fica reduzido para no máximo -30dB (CHARISE, 2018).

## 2.2 SOFTWARE

Nesta fase do projeto, são inclusos todos os programas utilizados para o aperfeiçoamento das antenas, tanto para comparar os cálculos feitos para a criação da antena como para criação do enlace.

### 2.2.1 Jcoppens

O Site *Jcoppens* oferece um *software* que tem o objetivo de calcular antenas conforme os dados selecionados pelo usuário, comparar os resultados feitos manualmente e assim avaliar com mais restrição os valores da antena.

O programa oferece dados complementares aos pesquisados nos livros principais do projeto, como o diâmetro do condutor e as faixas de largura de banda. A Figura 2 apresenta os dados.

Figura 2 - *Software* para cálculo da antena

**Detalhes de design e construção de uma antena helicoidal**

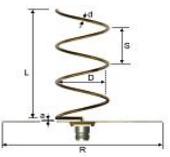
**Insira os dados**

[Fotos 1](#) [Fotos 2](#) [Calculadora quadrifilar](#)

Frequência de design	<input type="text" value="2400"/>	MHz
Número de voltas	<input type="text" value="14"/>	
Etapa de uma volta (em comprimentos de onda)	<input type="text" value="0.25"/>	
<input type="button" value="Calcular"/>		

**Os resultados**

Indicação de medições. As letras correspondem à tabela abaixo.  
Para obter uma ampliação, clique na imagem.



Comprimento de onda		<input type="text" value="125"/>	milímetros
Diâmetro ideal (interno)	<b>D =</b>	<input type="text" value="43.4"/>	milímetros
Ganho		<input type="text" value="14.45"/>	dBi
Diâmetro do condutor	<b>d =</b>	<input type="text" value="2.5"/>	milímetros
Passo da hélice (entre centros)	<b>S =</b>	<input type="text" value="31.2"/>	milímetros
Folga da seção de adaptação	<b>a =</b>	<input type="text" value="1.2"/>	milímetros
Comprimento total do condutor		<input type="text" value="1962.1"/>	milímetros
Diâmetro do refletor (mínimo)	<b>R =</b>	<input type="text" value="77.5"/>	milímetros
Comprimento total da antena	<b>L =</b>	<input type="text" value="437.5"/>	milímetros

**Características de design**

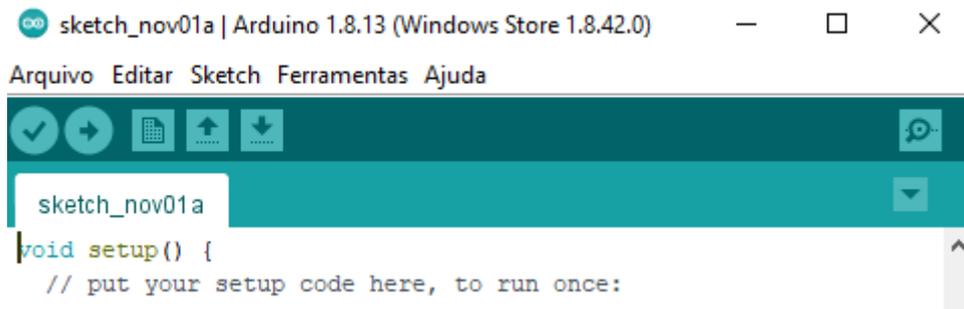
Largura de banda (@ -1dB)	Fmax / Fmin:	<input type="text" value="1.06"/>
	Fmax:	<input type="text" value="2472.6"/> MHz
	Fmin:	<input type="text" value="2329.52"/> MHz
Largura de banda (@ -3dB)	Fmax / Fmin:	<input type="text" value="1.12"/>
	Fmax:	<input type="text" value="2544.32"/> MHz
	Fmin:	<input type="text" value="2263.86"/> MHz
Largura do feixe (@ -3dB)		<input type="text" value="27.7"/> graus

Fonte: site jcoppens.

## 2.2.2 Software Arduino IDE (Ambiente de Desenvolvimento Integrado)

O *software* Arduino tem o objetivo de escrever programas da forma que necessita, apenas para os seus modelos de placa. Fácil de programar, ainda oferece uma grande quantidade de recursos na internet. Sua programação é escrita em funções em C e C++, é usado para escrever e compilar em placas de arduinos (HORTA, 2019). Na Figura 3 apresenta a janela do *software* Arduino.

Figura 3 - Arduino IDE



Fonte: Elaboração do autor, 2020.

O objetivo do Arduino (IDE) é ser o programa que envia o comando da placa Arduino para controlar o módulo transceptor, intérprete entre as duas antenas, com o propósito de codificar e decodificar o sinal das mesmas, conectando assim o enlace e enviando os dados de uma antena para a outra.

## 2.3 CÁLCULOS REFERENCIAIS

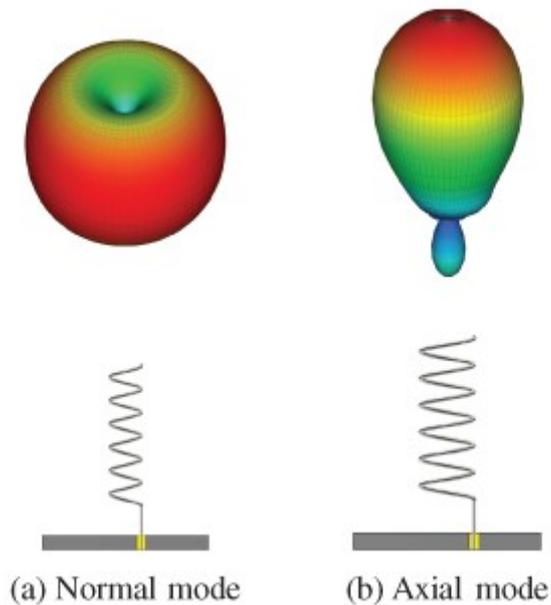
Aqui são analisados os cálculos referentes a criação das antenas e das equações de enlace para que sejam definidos, comparados e analisados com os *softwares* anteriormente citados.

### 2.3.1 Equação para a criação da antena

Nessa parte do trabalho, são realizados os cálculos devidos para a criação da antena de acordo com o modo. Para que uma antena seja omnidirecional, a característica mais importante é a dimensão da hélice, conforme a Figura 4(a), pois devem ser pequenas em comparação com o comprimento de onda, ou seja,  $D \ll \lambda$  e, usualmente, também  $L \ll \lambda$ .  $D$  é o diâmetro e  $\lambda$  é o comprimento de onda e onde  $L$  é o comprimento do fio de uma espira (BALANIS, 2005).

Uma hélice em modo normal de operação é eletricamente pequena e, portanto, tem baixa eficiência.

Figura 4 - Modos de radiação: (a) Omnidirecional e (b) Axial



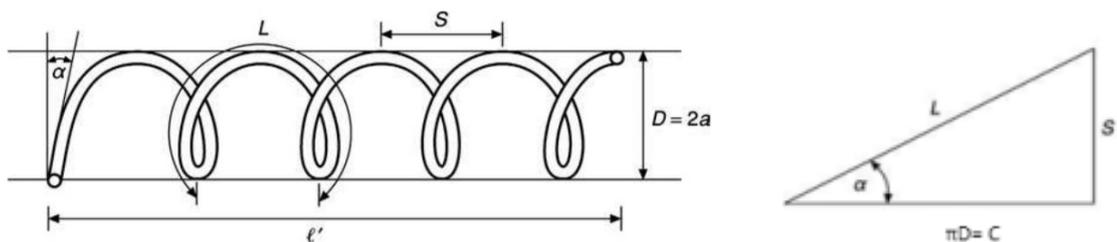
Fonte: STROKI; Pedro, (2020).

No modo axial a antena radia na mesma direção que a orientação da matriz (longitudinal). Quanto maior a quantidade de espiras, mais estreito se torna o feixe. O modo axial acontece quando a circunferência  $C$  da hélice é da ordem de um comprimento de onda. Hélices com poucas voltas obtêm melhor desempenho em uma faixa de frequências correspondente a (BALANIS, 2005):

$$\frac{3}{4}\lambda \leq C \leq \frac{4}{3}\lambda \quad (1)$$

Sendo que  $C$  é a circunferência da hélice.

Figura 5 - Antena helicoidal e seus parâmetros



Fonte: FUSCO, Vicent (2020, p. 183).

Para o cálculo dos parâmetros da Figura 5, são utilizadas as equações a seguir:

$$\alpha = \text{tg}^{-1}\left(\frac{S}{\pi D}\right) \quad (2)$$

Na qual,  $\alpha$  é ângulo de passo,  $S$  é *pitch* ou passo e  $D$  é o diâmetro da hélice.

$$L^2 = (\pi D)^2 + S^2 \quad (3)$$

$$\ell' = N \cdot S \quad (4)$$

Sendo que  $\ell'$  é a altura da hélice  $N$  é número de espiras.

$$L_t = N \cdot L \quad (5)$$

Onde  $L_t$  é o comprimento da bobina helicoidal.

$$C = \pi D = 2\pi a \quad (6)$$

Na qual  $a$  é raio da hélice.

$$S = C \cdot \text{tg}(\alpha) \quad (7)$$

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (8)$$

Sendo que  $v$  é a velocidade de fase da onda, para este trabalho foi considerada a velocidade da luz ( $3 \times 10^8 \text{m/s}$ ), pois tanto a permissividade elétrica relativa ( $\epsilon_r$ ) quanto a permeabilidade magnética relativa ( $\mu_r$ ) no meio de propagação, ar, tendem a 1; e  $f$  é a frequência.

$$Z_{in} = 140 \frac{C}{\lambda} \quad (9)$$

Sendo que  $Z_{in}$  é impedância de entrada da antena.

$$G = \frac{26000}{LFMP^2} = 6,2 \left(\frac{C}{\lambda}\right)^2 \cdot N \left(\frac{S}{\lambda}\right) \quad (10)$$

Onde  $G$  é o ganho da antena e  $LFMP$  é a Largura de Feixe de Meia Potência.

Alguns dados podem ser alterados pelo usuário. Sendo assim, foi criada uma antena de porte pequeno para que fosse mais prático o transporte para diversos tipos de ambientes.

A intenção dos dados que fosse mais próxima possível da antena para que o módulo transceptor responde-se de acordo com as equações (2) até (8):

$$f = 2,4 \text{ GHz}$$

$$N = 14$$

$$D = 0,0434 \text{ m}$$

$$a = 0,0217 \text{ m}$$

Os valores calculados pelas equações (2) até (8) são:

$$C = 0,13634 \text{ m}$$

$$S = 0,0312 \text{ m}$$

$$\alpha = 13,4^\circ$$

$$L = 0,05517 \text{ m}$$

$$\ell' = 0,437 \text{ m}$$

$$L_t = 0,66 \text{ m}$$

$$\lambda = 0,12491 \text{ m}$$

Para que fosse calculada, a impedância da antena deve ser medida em Ohms, como antena de onda viajante. Dessa forma, calcula-se pela equação (9):

$$Z_{in} = 140 \cdot \frac{0,136}{0,124} = 152,81 \Omega \quad (11)$$

O ganho pode ser calculado e estimado de diferentes maneiras. Contudo, por ora, apresenta-se um método de estimativa muito simples e, ao mesmo tempo, eficaz calcula-se pela equação (10):

$$G = 6,2 \left( \frac{0,136}{0,124} \right)^2 \cdot 14 \left( \frac{0,031}{0,124} \right) \quad (12)$$

$$G = 25,83 \rightarrow 10 \cdot \log(25,83) = 14,12 \text{ dBi} \quad (13)$$

“Essa equação é apresentada como equação de ganho, mas não inclui perdas no fio (usualmente, pequenas), e perdas no circuito de casamento (que podem ser de 1 dB ou mais) devem ser consideradas separadamente. A equação inclui a redução de ganho devido a imperfeições de diagrama, como preenchimento de nulo e lóbulos laterais, que ocorrem frequentemente na prática. Originalmente, o valor usado por Kraus para a constante principal era da ordem de 15, mas foi observado que era muito alto [5]. Extensa investigação experimental mostrou que a constante no numerador dessa equação variava entre 4,2 e 7,7, para os valores de parâmetros empregados [6]. Com base em (10), o ganho varia com  $f^3$ , embora experimentos indiquem que isso é estritamente verdadeiro somente para  $N$  próximo de 10. A variação de (10) com  $N$  é linear, de modo que dobrar o comprimento da hélice adiciona 3 dB ao ganho. Contudo, medidas mostraram que isso era demasiado [6]. A variação com a circunferência na forma  $(C/\lambda)^2$  é limitada ao intervalo em *equation reference goes here*, e experimentos mostraram que o ganho é máximo em torno de  $C = 1,1\lambda$  [6]. STUTZMAN, 2012, p.201.”

### 2.3.2 Equação de Friis

A equação de transmissão de Friis relaciona a potência recebida à potência transmitida entre duas antenas separadas por uma distância  $R > (2D^2)/\lambda$ , onde  $D$  é a maior dimensão de qualquer antena (BALANIS, 2005).

Em condições de análise de uma propagação, é considerado o vácuo como meio de transmissor, ou seja, uma propagação em espaço livre. Isso acontece pois o modelo de espaço livre não considera a existência de qualquer obstáculo entre transmissor e receptor.

Lembrando que para a análise as antenas são consideradas sem perdas, com eficiência de transmissão 100% ( $\eta = 1$ ), as polarizações das antenas estão casadas, com fator de casamento de polarização (FCP) igual a 1 e este é relativo à diferença angular entre as polarizações da onda e da antena receptora.

A densidade de potência diminui à medida que a onda avança no espaço, considerando um transmissor isotrópico, pode-se definir a densidade de potência irradiada como:

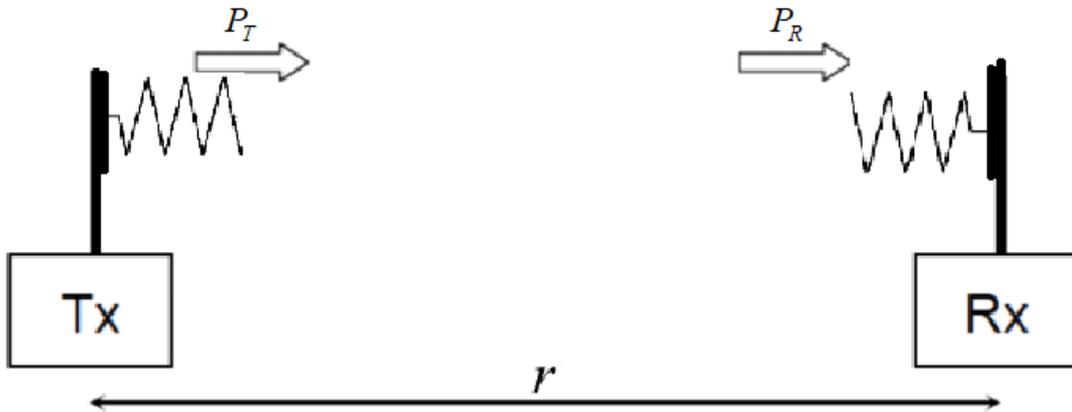
$$\mathcal{P} = \frac{P_T}{4\pi r^2} [\text{W/m}^2] \quad (14)$$

Sendo que  $P_T$  é a potência transmitida à antena de transmissão (W) e  $r$  é a distância entre elas (m). Para os demais tipos de antenas usa-se:

$$\mathcal{P} = \frac{D_T P_T}{4\pi r^2} [\text{W/m}^2] \quad (15)$$

Seja o enlace de rádio mostrado na Figura 6, consistindo em uma antena transmissora e de uma antena receptora separadas por uma distância  $r$ .

Figura 6 - Enlace de duas antenas



Fonte: Elaboração do autor ,(2020).

A potência da antena receptora é definida por:

$$P_R = \mathcal{P}A_e \quad (16)$$

Sendo que  $A_e$  é abertura efetiva da antena ( $\text{m}^2$ ), que pode ser associada como:

$$\frac{A_e}{D_R} = \frac{\lambda^2}{4\pi} \rightarrow A_e = \frac{D_R \lambda^2}{4\pi} \quad (17)$$

E  $D_R$  é a diretividade da antena receptora (em unidade). Substituindo a equação (17) na (16) tem-se:

$$P_R = D_T D_R P_T \left( \frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 \quad (18)$$

A equação (18) consiste na equação de Friis, que associa a potência transmitida entre as antenas em determinadas circunstâncias, que pode ser escrita no domínio logarítmico como:

$$P_R \text{ (dBmW)} = P_T \text{ (dBmW)} + D_T \text{ (dB)} + D_R \text{ (dB)} + L_p \text{ (dB)} \quad (19)$$

Sendo que  $L_p$  (do inglês *loss path*) é a perda no espaço livre, calcule-se:

$$L_p = \left( \frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 \quad (20)$$

Que pode ser expressa pela propriedade logarítmica por:

$$L_p \text{ (dB)} = 20 \log \left( \frac{\lambda}{4\pi r} \right) \quad (21)$$

Ainda de (19), pode-se expressar:

$$P_T \text{ (dBmW)} = 10 \log \left( \frac{P}{1 \text{ mW}} \right) \quad (22)$$

Substituindo a potência  $P$ :

$$P_T \text{ (dBmW)} = 10 \log \left( \frac{\frac{V^2}{R}}{1 \text{ mW}} \right) \quad (23)$$

Sendo usado  $r = 100$  metros, como medida hipotética.

Os valores calculados pelas equações (21) e (23):

$$L_p \text{ (dB)} = 20 \log \left( \frac{0,125}{4\pi \cdot 100} \right) = -80 \text{ dB} \quad (24)$$

$$P_T \text{ (dBmW)} = 10 \log \left( \frac{3,3^2}{152,81} \cdot 1000 \right) = 18,52 \text{ dBmW} \quad (25)$$

Como os ganhos em dBi já foram definidos pelos resultados da equação (10), logo:

$$G = D_T = D_R = 14,14 \text{ dBi} \quad (26)$$

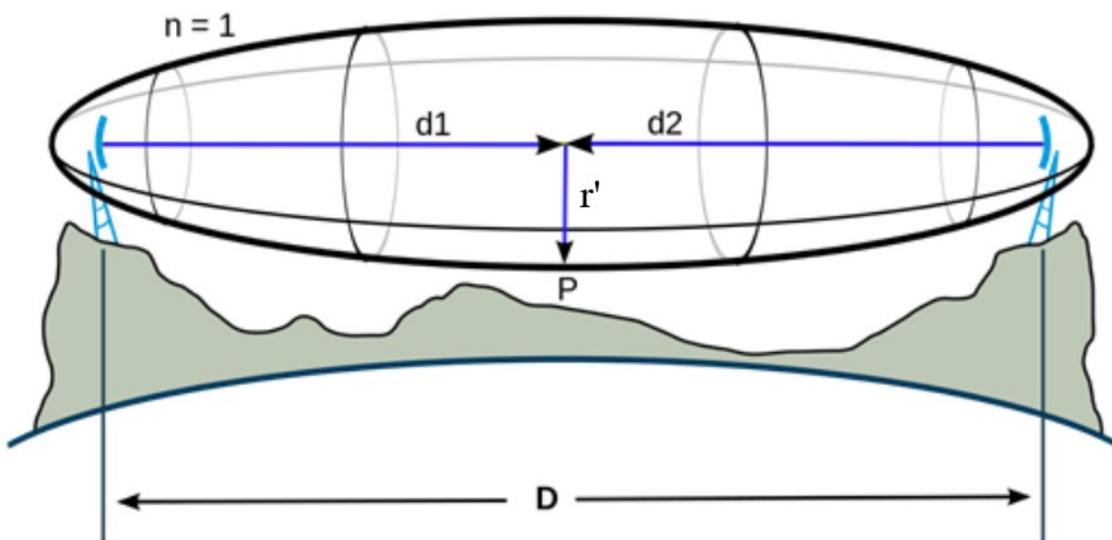
Os valores encontrados e inclusos na equação (19):

$$P_R = 18,52 \text{ dBmW} + 14,12 \text{ dB} + 14,12 \text{ dB} - 80 \text{ dB} = -33,24 \text{ dBmW} \quad (27)$$

### 2.3.3 Zona de Fresnel

O conceito da zona de Fresnel é relacionado às perdas sobre a difração, ou seja, é aquele para o qual o raio difratado e o de linha de visada direta estão defasados de um número inteiro de meios comprimentos de onda. Como apresenta a Figura 7.

Figura 7 - Propagação das ondas (Zonas de Fresnel)



Fonte: MARTINS; Ramon (2020, pg. 14)

$$R_n = \sqrt{\frac{(n \cdot \lambda \cdot d_1 \cdot d_2)}{d_1 + d_2}} \quad (28)$$

Sendo que  $R_n$  é o raio da  $n$ -ésima zona de Fresnel (m),  $d_1$  é a distância do maior no centro da linha de visada da primeira antena (m),  $d_2$  é a distância do maior no centro da linha de visada da segunda antena (m).

Como a simulação não é para obstruções no caminho ou alguns sinistros, não há necessidade de usá-la.

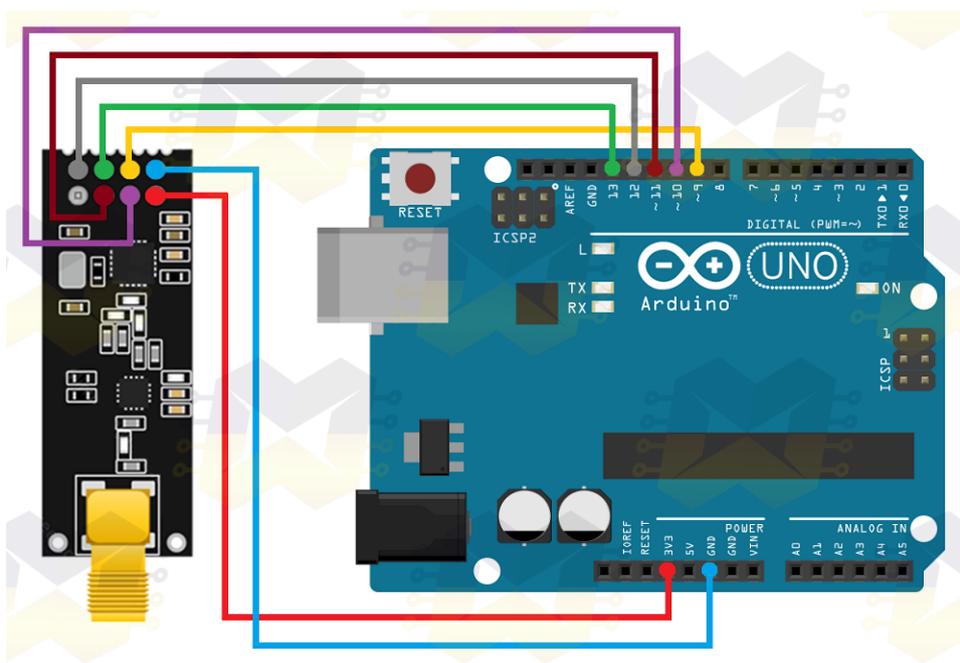
### 3 MATERIAL E MÉTODO

Neste capítulo é tratado a respeito do material utilizado e os métodos para o projeto. São detalhadas as ferramentas, equipamentos e programas utilizados, tudo para construir uma antena de forma manual.

#### 3.1 MICROCONTROLADORES

O objetivo do controlador é fazer testes com a antena e avaliar o seu desempenho, como a Figura 8. Percebe-se que o “Módulo Transceptor *Wireless NRF24L01*” já possui uma antena própria de 2,4 GHz, porém está sendo utilizado como transmissor e receptor com o conjunto de Arduino para as antenas helicoidais. Nesse caso foi retirada sua antena comercial.

Figura 8 - Conexão entre o Arduino e o NRF24L01



Fonte: OLIVEIRA; Euler (2020).

A função mais importante do módulo é a de decodificar e codificar o enlace entre as antenas, trabalhando com frequência de 2,4 GHz ~ 2,52 GHz (de acordo com o *datasheet* do módulo). Com isso pode-se usar as duas antenas para testes práticos, ligando os arduinos embutidos aos módulos e enviando seus dados.

O objetivo principal dos microcontroladores é mostrar o funcionamento da antena. Logo o aparelho apresenta um simples enlace entre ambas, enviando um código.

### 3.1.1 Arduino Uno

O *hardware* Arduino uno apresentado na Figura 9, é utilizado no desenvolvimento do enlace. É uma placa de desenvolvimento com microcontrolador Atmel. Tem o objetivo de comunicar o NRF24 com o computador. Arduino recorrendo ao protocolo SPI. O processamento de dados entre rádio e microcontrolador é realizado recorrendo à linguagem C++ na qual também a biblioteca RF24 foi desenvolvida (HORTA, 2019).

Figura 9 - Arduino Uno



Fonte: OLIVEIRA; Euler (2020).

Tabela 1 - *Datasheet* Arduino

Arquitetura	AVR
Família	ATMega328P
Voltagem de Entrada	7-12 V
Memória Flash	32 kB
SRAM	2 kB
Velocidade de Relógio	16 MHz
Entradas Analógicas	8
Entradas/Saídas Digitais	14
SPI	SIM
Saídas PWM	8
Peso	25 g
Dimensões da PCB	68x54 mm

Fonte: Arduino, (2020)

### 3.1.2 Módulo transceptor *wireless* NRF24L01 2,4 GHz com antena

O modelo ilustrado na Figura 10 uma versão do NRF24 com um conector SMA que permite alterar o tipo de antena de forma a realizar diferentes testes de cobertura. O conector SMA permite testar diferentes abordagens, trocando apenas a antena por outras com diferentes tamanhos, formatos ou materiais, porém respeitando algumas características para funcionamento como a banda de frequência ISM (*Industrial Scientific and Medical* são bandas reservadas internacionalmente para o desenvolvimento industrial, científico e médico) mundial dos 2,4 GHz.

Figura 10 - NRF24L01 2,4 GHz com antena



Fonte: OLIVEIRA; Euler (2020).

Tabela 2 - *Datasheet* NRF24L01 2,4 GHz com

Tensão de alimentação:	1,9 V – 3,6 V;
Taxa de dados:	250 kbps a 2 Mbps;
Antena:	2 dBi;
Frequência de operação:	2400 MHz~2524 MHz;
Modulação:	GMSK;
Transmissão de energia:	>20 dBm, 50 $\Omega$ ;
Sensibilidade do receptor:	-95 dBm;
Max. Emissão atual:	115 mA;
Temperatura de armazenamento:	-45 graus a 125 graus;
Ganho de PA:	20 dB;
Ganho de LNA:	10 dB;
Comprimento da antena:	107 mm;
Dimensões:	41x15,2x11 mm.

Fonte: nordic semicondutores (2020).

## 3.2 MATERIAL PARA O DESENVOLVIMENTO DAS ANTENAS

Nessa parte descreve-se sobre qual o material utilizado para criação da antena e sobre a sua criação.

### 3.2.1 Material utilizado

Após os cálculos mostrados no capítulo anterior, foi efetuada a criação da antena de forma manual. Foi utilizado como material:

- Cano PVC 40 mm;
- Super cola;
- Fio rígido 2,5 mm<sup>2</sup>;
- Chapas de alumínio 30x30 cm
- Toras de madeira;
- Cabos 0,5 mm<sup>2</sup>;
- Conector SMA;
- Tubo de solda estanho.

### 3.2.2 Criação da antena

No processo de criação, são avaliados os valores fornecidos pelo *datasheet* para definir o formato da antena e para que o módulo aceite o protótipo que será construído. Para as medidas ficarem com a maior precisão possível é usado um paquímetro, conforme a Figura 11.

Figura 11 – Paquímetro para medições para o enrolamento dos cabos.



Fonte: Elaboração do autor (2020).

É preciso medir o cano de acordo com o passo da hélice. Após as medidas, os cabos são enrolados de forma helicoidal, definindo a direção dos cabos. Vale lembrar que as duas antenas devem estar no mesmo formato para que, assim, se utilize de super cola para deixar os cabos fixados ao cano de PVC.

Por fim, a escolha da direção da polarização circular da mão esquerda foi feita devido a alguns roteadores comerciais serem polarizados de forma circular da mão direita, o que pode provocar interferência entre variados tipos de antenas nos percursos dos testes. Conforme Figura 12.

Figura 12 - Contornando os cabos conforme a polarização circular



Fonte: Elaboração do autor (2020).

Outro detalhe foi a inclusão das chapas de alumínio, feita com o objetivo de ser o plano terra e possuindo a função de refletir as ondas a partir do elemento irradiante da antena. Logo, fura-se a chapa para que o cabo passe por fora e conecte-se cano e chapa em um fragmento de madeira.

Em seguida é soldado os conectores SMA nas antenas para poder conversar com o NRF24L01. Como mostra a Figura 13.

Figura 13 - Isolamentos dos cabos.



Fonte: Elaboração do autor (2020).

Após a criação da antena sem o acabamento, a mesma já pode ser utilizada na realização dos testes.

No decorrer dos testes realizados, a antena vai respondendo e, de acordo com suas respostas, são criadas melhorias para o aperfeiçoamento da mesma, como mostra a Figura 14.

Também foram realizadas modificações para que partes mais sensíveis da antena (como os conectores SMA) se tornassem mais resistentes. Por último, o protótipo é pintado por fins de estética e durabilidade para a universidade, conforme Figura 15.

Figura 14 - Antenas pré-prontas para uso.



Fonte: Elaboração do autor (2020).

Figura 15 - Antena concluída



Fonte: Elaboração do autor (2020).

### 3.3 PROGRAMAÇÃO

O autor da biblioteca oferece, gratuitamente no fórum de sua loja online de produtos eletrônicos, bibliotecas para a utilização do NRF24L01, explicando passo a passo como é usado. A biblioteca Escolhida foi levemente modificada para o uso da antena.

Para o emissor o código utilizado é:

```

3 #include <SPI.h> //INCLUSÃO DE BIBLIOTECA
4 #include <nRF24L01.h> //INCLUSÃO DE BIBLIOTECA
5 #include <RF24.h> //INCLUSÃO DE BIBLIOTECA
6
7 RF24 radio(9, 10); //CRIA UMA INSTÂNCIA UTILIZANDO OS PINOS (CE, CSN)
8
9 const byte address[6] = "00002"; //CRIA UM ENDEREÇO PARA ENVIO DOS
10 //DADOS (O TRANSMISSOR E O RECEPTOR DEVEM SER CONFIGURADOS COM O MESMO
11 ENDEREÇO)
12
13 void setup() {
14   radio.begin(); //INICIALIZA A COMUNICAÇÃO SEM FIO
15   radio.openWritingPipe(address); //DEFINE O ENDEREÇO PARA ENVIO DE DADOS AO
16   RECEPTOR
17   radio.setPALevel(RF24_PA_HIGH); //DEFINE O NÍVEL DO AMPLIFICADOR DE POTÊNCIA
18   radio.stopListening(); //DEFINE O MÓDULO COMO TRANSMISSOR (NÃO RECEBE DADOS)
19 }

```

```

20
21 void loop() {
    const char text[] = "TCC UNISUL"; //VARIÁVEL RECEBE A MENSAGEM A SER
    TRANSMITIDA
    radio.write(&text, sizeof(text)); //ENVIA AO RECEPTOR A MENSAGEM
    delay(1000); //INTERVALO DE 1 SEGUNDO
}

```

Para o receptor o código utilizado é:

```

#include <SPI.h> //INCLUSÃO DE BIBLIOTECA
1 #include <nRF24L01.h> //INCLUSÃO DE BIBLIOTECA
2 #include <RF24.h> //INCLUSÃO DE BIBLIOTECA
3
4 RF24 radio(9, 10); //CRIA UMA INSTÂNCIA UTILIZANDO OS PINOS (CE, CSN)
5
6 const byte address[6] = "00002"; //CRIA UM ENDEREÇO PARA ENVIO DOS
7 //DADOS (O TRANSMISSOR E O RECEPTOR DEVEM SER CONFIGURADOS COM O MESMO
8 ENDEREÇO)
9
10 void setup() {
11   Serial.begin(9600); //INICIALIZA A SERIAL
12   radio.begin(); //INICIALIZA A COMUNICAÇÃO SEM FIO
13   radio.openReadingPipe(0, address); //DEFINE O ENDEREÇO PARA RECEBIMENTO DE
14   DADOS VINDOS DO TRANSMISSOR
15   radio.setPALevel(RF24_PA_HIGH); //DEFINE O NÍVEL DO AMPLIFICADOR DE POTÊNCIA
16   radio.startListening(); //DEFINE O MÓDULO COMO RECEPTOR (NÃO ENVIA DADOS)
17 }
18
19 void loop() {
20   if (radio.available()) { //SE A COMUNICAÇÃO ESTIVER HABILITADA, FAZ
21     char text[32] = ""; //VARIÁVEL RESPONSÁVEL POR ARMAZENAR OS DADOS RECEBIDOS
22     radio.read(&text, sizeof(text)); //LÊ OS DADOS RECEBIDOS
23     Serial.println(text); //IMPRIME NA SERIAL OS DADOS RECEBIDOS
24   }
}

```

### 3.4 RESULTADO

Após sua construção, conclui-se que ambas são antenas completamente idênticas em todos os aspectos, principalmente em suas polarizações circulares. Devido a análise teórica sobre polarização circular.

Na Figura 16 é mostrado o primeiro teste a ser avaliado com uma distância de 10 metros.

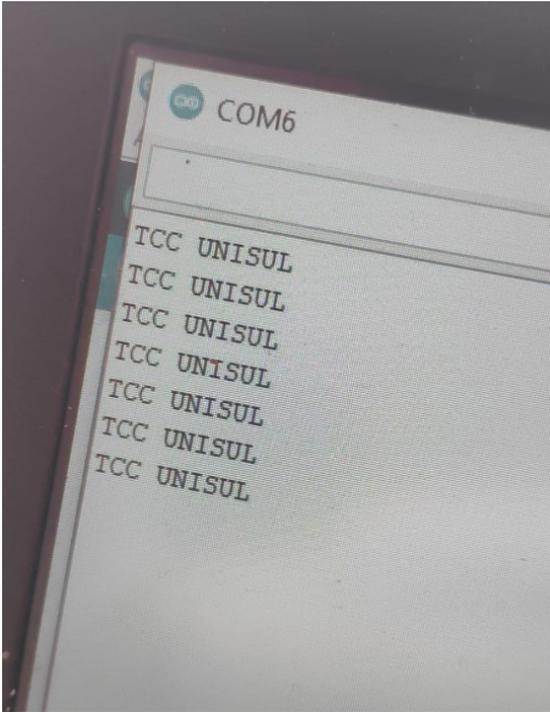
Figura 16 - Testes de antenas com distância de 10 metros



Fonte: Elaboração do autor (2020).

Ao ser testada a uma distância de aproximadamente 10 metros, a antena respondia o comando conforme foi configurada, como mostra a Figura 17. A decisão de avaliar a performance enviando dados é mais efetiva e fácil para acompanhar durante o processo pois, a intenção é o funcionamento da antena e não a distância que esta pode chegar.

Figura 17 - Monitor serial do Arduino IDE

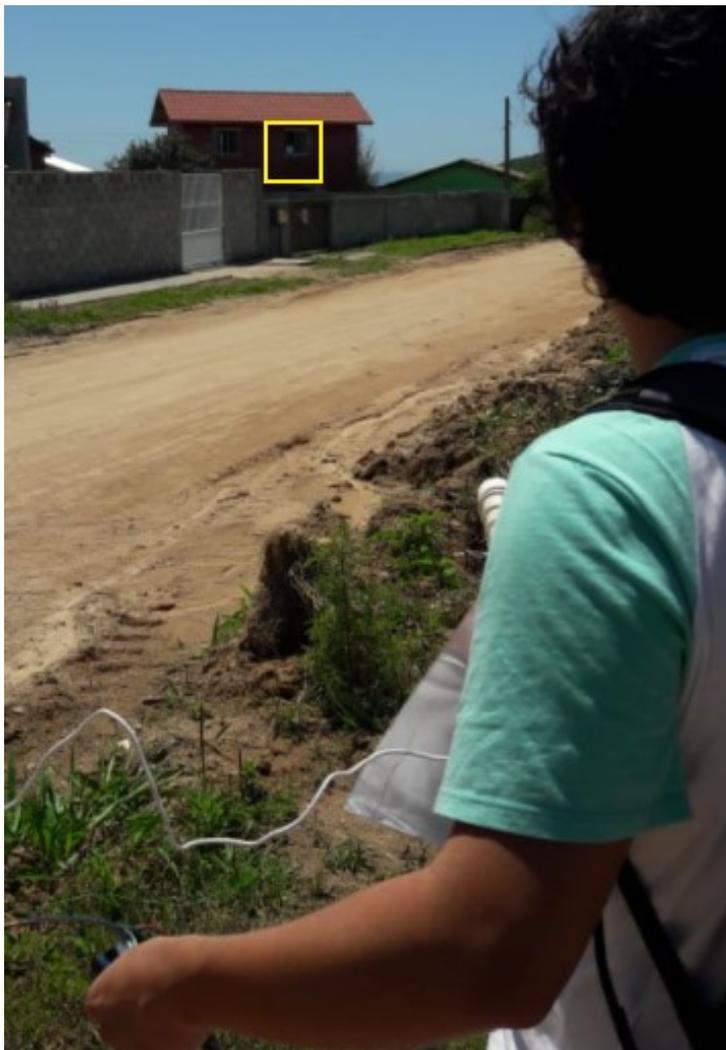


Fonte: Elaboração do autor (2020).

Após o teste a 10 metros, são realizados experimentos com distâncias maiores para melhor avaliar a performance das antenas em ambientes abertos e outro com menor nível de elevação.

O quadrado amarelo desenhado na Figura 18, mostra onde a antena receptora foi posicionada com teste efetuado à distância de sessenta e seis metros.

Figura 18 - Teste da antena



Fonte: Elaboração do autor (2020).

Na Figura 19, o ponto inicial é denominado de 0 com a cor azul. Pontos amarelos são locais onde foram feitos testes e há comunicação entre as antenas. São apresentadas distâncias para testes simples. Desta forma, a antena pode ser levada para ambientes abertos a fim de colocar o enlace em prática.

O ponto vermelho define o local onde a antena perdeu por completo sua comunicação. Nesse local a diferença de elevação entre este e o ponto inicial chega a cinco metros, ou seja, há uma difração, o que diminui seu desempenho e, conseqüentemente, a potência do seu sinal.

Figura 19 - Locais onde foram feitos os testes



Fonte: Elaboração do autor (2020).

Após resultados apurados, conclui-se que é possível utilizar o protótipo para testes de enlace em laboratório, com o objetivo de demonstrar o funcionamento de antena helicoidal.

## 4 CONCLUSÃO

O objetivo do projeto foi o desenvolvimento de um kit de antenas didáticas que oferecesse uma opção de estudo para que futuros acadêmicos possam aprender, na prática, sobre a matéria de antenas. Por ser um dispositivo simples, oferece conhecimento base. Além disso, o resultado de cada simulação feita no *software e hardware* Arduino oferece os elementos suficientes para que sejam efetuados os testes de enlace simples.

A característica principal para a construção da antena helicoidal é sua forma de ser fabricada, que pode ser em espiral ou hélice a partir de múltiplos condutores. Utilizando as equações de (2) a (10), foi possível criar as principais características das antenas. Após este processo, é criada a antena de acordo com parâmetros citados no artigo.

De acordo com estudos e testes de campo realizados com as antenas helicoidais criadas, conclui-se que esta pode ser desenvolvida e se mostra eficiente para testes de enlace simples.

Devido à pandemia de COVID-19, que criou impedimentos à realização de testes em laboratório da Universidade, foi possível apenas realizar testes em campo aberto. Porém, pretende-se realizar melhores medições em laboratório acadêmico para avaliar os dados simulados e calculados.

## REFERÊNCIAS

- BALANIS, Constantine A.. **Teoria das antenas: análise e síntese**. 3. ed. Rio de Janeiro: John Wiley & Sons, 2005. 1136 p. Tradução e revisão técnica J. R. Souza.. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/978-85-216-2785-2/cfi/6/10!/4/2@0:0>. Acesso em: 10 jul. 2020.
- CHARISE, Di. **Qual é a diferença entre a antena RHCP e LHCP**. 2018. Drone24Hours. Disponível em: <https://www.drone24hours.com/blogdrone24hours/uncategorized/what-is-the-difference-between-rhcp-and-LHCP-antenna/?lang=en>. Acesso em: 20 fev. 2019.
- COPPENS, John. **Detalhes de design e construção de uma antena helicoidal**. [2012] data provável. Disponível em: <http://jcoppens.com/ant/helix/calc.php>. Acesso em: 4 mar. 2020.
- FUSCO, Vicent F., Teoria e Técnicas de Antenas [recursos eletrônicos]: princípios e práticas. Porto Alegre: Bookman, 2007
- HORTA, Bruno Filipe Costa. **Análise da Viabilidade de rede IP com nRF24L01+**. 2019. 118 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Informática, Instituto Politécnico, Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria, Leiria – Portugal, 2019.
- MARTINS, Ramon Mayor. **STC – Sistemas de Telecomunicação**. São José, 2016. 46 slides, color. Disponível em: [https://wiki.sj.ifsc.edu.br/wiki/images/9/98/2IFSC\\_Engenharia\\_STC\\_2016\\_1.pdf](https://wiki.sj.ifsc.edu.br/wiki/images/9/98/2IFSC_Engenharia_STC_2016_1.pdf). Acesso em: 07 maio 2020.
- OLIVEIRA, Euler. Como usar com Arduino: módulo transceptor wireless nrf24l01 2.4ghz com antena. Módulo Transceptor Wireless NRF24L01 2.4GHz com Antena. [2019] data provável. Disponível em: <https://blogmasterwalkershop.com.br/arduino/como-usar-com-arduino-modulo-transceptor-wireless-nrf24l01-2-4ghz-com-antena/>. Acesso em: 15 abr. 2020.
- OLIVEIRA, Julio César de. **Projeto e Otimização de Antenas Helicoidais Não Uniformes**. 2013. 80 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013. Cap. 1.
- PARACAMPO, Eng. L. (ed.). **óptica: fundamento da técnica**. Fundamento da técnica. [20--?] século provável. Disponível em: <http://www.novacon.com.br/basean3.htm>. Acesso em: 09 nov. 2020.
- SLADE, Bill. The Basics of Quadrifilar Helix Antennas. Disponível em: <http://orbanmicrowave.com/thebasicsofquadrifilarantennas/>. Acesso em: data de acesso no formato 23 abril. 2020
- STROSKI, Pedro Ney. **Antenas: parte 2**. parte 2. 2018. Disponível em: <https://www.electricalibrary.com/2018/09/28/antenas-parte-2/>. Acesso em: 2 jul. 2020.
- STUTZMAN, Warren L. *et al.* ANTENNA THEORY AND DESIGN,; volume 1. 3. ed. [S. L.]: John Wiley & Sons, 2012. 848 p. Tradução e revisão técnica J. R. Souza. Disponível em:

<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521632849/cfi/6/10!/4/2@0:0>. Acesso em: 2 out. 2020.

WOLF, Christian. Antena Yagi. Radartutorial. [S.I] [1997?]. Disponível em: <<https://www.radartutorial.eu/06.antennas/Yagi%20Antenna.en.html#this>> Acesso em: 20 abril. 2020.