

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

FAÚSTO LUCINI SAAVEDRA

**PROJETO DE UMA ANTENA HELICOIDAL NA BANDA DE 433 MHz
PARA A COMUNICAÇÃO ENTRE HARDWARES NO LABORATÓRIO DE
ACIONAMENTOS ELÉTRICOS**

Florianópolis

2020

FAÚSTO LUCINI SAAVEDRA

**PROJETO DE UMA ANTENA HELICOIDAL NA BANDA DE 433 MHz
PARA A COMUNICAÇÃO ENTRE HARDWARES NO LABORATÓRIO DE
ACIONAMENTOS ELÉTRICOS.**

Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Walter Pereira Carpes Jr.

Florianópolis

2020

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Saavedra, Faústto Lucini
PROJETO DE UMA ANTENA HELICOIDAL NA BANDA DE 433 MHz
PARA A COMUNICAÇÃO ENTRE HARDWARES NO LABORATÓRIO DE
ACIONAMENTOS ELÉTRICOS. / Faústto Lucini Saavedra ;
orientador, Walter Pereira Carpes Jr., 2020.
60 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,
Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2020.

Inclui referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. Antenas Helicoidais. I.
Pereira Carpes Jr., Walter . II. Universidade Federal de
Santa Catarina. Graduação em Engenharia Elétrica. III.
Título.

Faústo Lucini Saavedra

**PROJETO DE UMA ANTENA HELICOIDAL NA BANDA DE 433 MHz PARA A
COMUNICAÇÃO ENTRE HARDWARES NO LABORATÓRIO DE
ACIONAMENTOS ELÉTRICOS**

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Bacharel em Engenharia Elétrica” e aceito, em sua forma final, pelo Curso de Graduação em Engenharia Elétrica.

Florianópolis, 17 de dezembro de 2020.



Documento assinado digitalmente
Jean Viane Leite
Data: 18/12/2020 14:46:18-0300
CPF: 003.474.909-80

Prof. Jean Viane Leite, Dr.
Coordenador do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:



Documento assinado digitalmente
Walter Pereira Carpes Junior
Data: 18/12/2020 12:30:22-0300
CPF: 572.566.599-20

Prof. Walter Pereira Carpes Jr., Dr.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina



Documento assinado digitalmente
Renato Lucas Pacheco
Data: 18/12/2020 12:35:40-0300
CPF: 341.751.489-49

Prof. Renato Lucas Pacheco, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Marcelo Cizewski Borb, Esp.
Instituto Federal Catarinense

Este trabalho é dedicado aos meus pais.

“O pessimista vê dificuldade em toda oportunidade. O otimista vê oportunidade em toda dificuldade”

Winston Churchill

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Cleci T. Lucini e José G. Saavedra Terán, por todo carinho e amor, por toda confiança em mim depositada e ao apoio que sempre me deram, possibilitando ter uma boa educação. Agradeço meus irmãos, em especial, ao meu irmão Henrique, por todo exemplo de bom caráter e dedicação que me deu. Agradeço à minha namorada, Ana Paula Bona, pelo apoio nos últimos e mais complicados semestres da minha graduação. Agradeço minha cunhada Maiara Cristina de Lima Lucini, por todo carinho e incentivo. Agradeço a Ana Rita Menezes e Ernani Pereira Filho, por me receber como um filho em suas vidas, sempre me orientando e dando apoio.

Agradeço aos meus amigos Felipe S. da Silva, Jonas Pizzatto, André Nicoluzzi, Rafael S. Freitas, Ernani P. Neto, Marcel S. da Silva, Marcelo Pedro, Gustavo Bordignon, Marcelo B., Mauricio Nesello, Edson H. do Carmo Jr., Anderson M. Bruschi, João Octávio Da Campo, Ricardo Clemente, Gabriel Mendes e Victor Leduc por toda parceria, amizade e lealdade desde o início da faculdade. Agradeço aos meus colegas e amigos Rafael, Renan W., Lucas, Kaualy e Igor por terem me motivado a encarar estes últimos semestres e por muitas vezes terem desempenhado o papel de meus professores.

Agradeço ao Prof. Rodrigo Moretti, por sempre ter me auxiliado nos momentos mais difíceis e por toda a amizade. Agradeço ao amigo Lucas Guadagnin, por sempre ter prestado auxílio nos momentos em que minha saúde não esteve tão bem.

Agradeço ao Técnico Administrativo Cristian Mazzola Franzoi pelos auxílios, ensinamentos e alertas durante a reta final da minha graduação.

Agradeço ao meu orientador Prof. Walter Carpes Jr. por todas as conversas, orientações, palavras de incentivo e amizade.

RESUMO

Muitos estudantes de engenharia elétrica estudam motores elétricos todos os semestres e, por muitas vezes, algumas informações são apresentadas apenas em livros por falta de testes práticos nessas máquinas, seja por falta de recursos das universidades seja por falta de projetos que viabilizem esses testes.

Na Universidade Federal de Santa Catarina, existem diversos ensaios que tornam o conhecimento no ramo de máquinas elétricas muito abrangente e eficaz. No entanto, ainda há informações não possíveis de adquirir em aulas práticas, como as informações de partida do rotor bobinado destas máquinas, por exemplo.

Neste trabalho, a teoria de motores é discutida com o intuito de apresentar os obstáculos encontrados no estudo destas informações. E, como solução para o envio destes dados após sua aquisição para uma central de tratamento, será feito um estudo de possíveis projetos de antenas helicoidais que operem na frequência de 433 MHz.

Para isso, são utilizados fórmulas e esquemas bem conhecidos na construção de antenas helicoidais e, para simulação, o *software* gratuito MMANA-GAL, a fim de ser observado o comportamento da antena projetada.

Palavras-chave: Rotor Bobinado, Antena helicoidal, 433 MHz.

ABSTRACT

Many electrical engineering students study electric motors every year and often information is presented only in books due to the lack of practical tests on these machines, due to the lack of university resources or the lack of projects that make these practical tests feasible.

At the Federal University of Santa Catarina, there are several practical tests that make knowledge in the field of electrical machines very comprehensive and effective. However, there is still information that is not possible to acquire in practical classes, such as the starting information of the coiled rotor of these machines.

In this work, the motor theory is discussed in order to present the obstacles found in the study of this information and, as a solution for sending this data after the acquisition of them to a treatment center, a study of possible antenna designs operating at a frequency of 433 MHz will be made.

For this, well-known formulas and schemes are used in the construction of helical antennas and for simulation the free software MMANA-GAL, to observe the behavior of the designed antenna.

Keywords: Coiled rotor, Helical Antenna, 433 MHz.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Principais tipos de motores de corrente alternada (indução e síncrono).....	20
Figura 2 – Motor de indução trifásico.....	21
Figura 3 – Estator de um motor a indução.....	22
Figura 4 – Rotor bobinado.....	23
Figura 5 – Reostato de partida.....	24
Figura 6 – Corte transversal no motor trifásico.....	25
Figura 7 – Antenas Helicoidais do <i>Jet Propulsion Laboratory</i> (JPL).....	30
Figura 8 – Parâmetros de uma Antena Helicoidal e superfície plana.....	31
Figura 9 – Padrões de amplitude tridimensionais representativos de uma hélice operando no modo normal.....	33
Figura 10 – Padrões de amplitude tridimensionais representativos de uma hélice operando no modo axial.....	35
Figura 11 – Resistor <i>Shunt</i> (60mV, 20A).....	40
Figura 12 – Conexão Rotor- Reostato.....	40
Figura 13 - Diagrama de Radiação da antena operando em modo axial.....	46
Figura 14 – Diagrama 3D do campo de radiação.....	46
Figura 15 – Relação de Ondas Estacionárias x frequência.....	47
Figura 16 - Ganho em dBi x Frequência x F/B.....	48
Figura 17 - Diagrama de Radiação da antena operando em modo normal.....	49
Figura 18 - Diagrama 3D do campo de radiação.....	49
Figura 19 - Relação de Ondas Estacionárias x frequência.....	50
Figura 20 - Ganho em dBi x Frequência x F/B.....	51
Figura 21 – Diagrama de radiação da antena otimizada operando em Rn.....	52
Figura 22 – Diagrama 3D da antena otimizada operando em Rn.....	53
Figura 23 - Relação de Onda Estacionária x frequência da antena otimizada.....	53
Figura 24 - Figura 20 - Ganho em dBi x Frequência x F/B da antena otimizada.....	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANATEL	Agencia Nacional de Telecomunicações
IEEE	Instituto de Engenharia Elétrica e Eletrônica
LABMAQ	Laboratório de Acionamentos Elétricos
CA	Corrente Alternada
dB	Decibéis
dBi	Ganho da Antena Isotrópica
RF	Radio Frequência
SWR	Relação de onda estacionaria
F/B	Relação Frente/ Costas
Ra	Modo Axial
Rn	Modo Normal
GA	Ganho
E_ϕ	Componente do campo elétrico na direção
E_θ	Componente do campo elétrico na direção θ
Símbolos gregos	
α	Angulo de Passo "pitch"(graus)
α_{cp}	Angulo de Inclinação para polarização circular (graus)
β	Constante de Fase de uma Onda (graus)
θ	Angulo de Incidência ou de inclinação (graus)
λ	Comprimento de Onda (m)
μ	Permeabilidade magnética (H/m)
Ω	Impedância ou resistência
ψ	Ângulo de fase entre campos na direção E_ϕ e E_θ

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
2	MOTIVAÇÃO	17
3	OBJETIVOS	17
3.1	OBJETIVO GERAL.....	17
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.	17
4	ESTRUTURA DO TRABALHO	19
5	MOTORES ELÉTRICOS DE INDUÇÃO.....	19
5.1	MÁQUINAS ELÉTRICAS DE CORRENTE ALTERNADA	19
5.2	MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO BOBINADO	21
5.3	O ESTATOR.....	22
5.4	O ROTOR BOBINADO	23
5.5	FUNCIONAMENTO DE UM MOTOR DE INDUÇÃO.....	25
5.6	O ESCORREGAMENTO DO ROTOR.....	26
5.7	A FREQUÊNCIA DAS CORRENTES NO ROTOR.....	27
6	ANTENAS.....	29
6.1	ANTENAS HELICOIDAIS	30
6.1.1	Geometria de uma antena helicoidal	31
6.1.2	Modos de operação	33
6.1.2.1	Operação no modo normal (Rn)	34
6.1.2.2	Operação no modo axial.....	36
7	FREQUÊNCIA DE OPERAÇÃO DA ANTENA	39
8	MÉTODO DE AQUISIÇÃO DO SINAL	40
9	RESULTADOS	43
9.1	PARÂMETROS DO COMPRIMENTO DE ONDA.....	43
9.2	PROJETO NO MODO AXIAL (RA).....	43
9.3	PROJETO NO MODO NORMAL (RN)	45
9.4	SIMULAÇÃO	45
10	CONCLUSÃO	53

1 INTRODUÇÃO

Antenas são equipamentos de comunicação que atuam através da emissão ou captação de ondas eletromagnéticas, sendo amplamente utilizadas desde o advento do telégrafo sem fio, implementado por Guglielmo Marconi, até aplicações aeroespaciais (*Nobel Lectures*, 2020).

A cada momento, as inovações tecnológicas vão ficando mais acessíveis ao público de modo geral. Por isso, pode-se encontrar com grande facilidade um desses dispositivos em diversas aplicações, seja ela uma antena de estação de rádio, telefonia celular, carros, televisores em nossos lares, e outras. Com o surgimento da internet, isso se tornou ainda mais factível, pois em qualquer lugar onde houver acesso à internet, haverá uma antena presente em um roteador wi-fi ou nos bolsos das pessoas, nos celulares (GODINHO,2018).

Além de toda a comodidade por conta da troca de informações em longas ou curtas distâncias, sem a necessidade de conexões físicas, o emprego de antenas também se destaca na redução de custos e danos ao meio ambiente. Algumas centenas de metros de cabos condutores são poupados a cada antena implementada, sendo inestimada a redução do impacto ambiental, evitando poluição por resíduos de instalações de transmissão de dados.

Cada antena possui uma finalidade, uma banda de operação, um modo de operar e uma polarização. Desse modo, existe uma vasta variedade de formas e tamanhos. Pode-se encontrar uma vasta lista de antenas e a definição de cada uma no documento Standard for “*Definitions of Terms for Antennas*”, produzido pelo Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE) em 2013.

A antena de hélice ou helicoidal, em especial, é um modelo de antena vastamente utilizado por conta da sua facilidade de construção, tamanho razoável, levando em consideração transmissões locais, baixo custo, além de permitir a emissão ondas com polarização circular, favorecendo a comunicação com outros tipos de antenas.

Sendo assim, o presente trabalho tratará sobre o projeto de uma antena helicoidal operando na frequência de 433 MHz, faixa destinada pela Anatel, na resolução 365, de 2004, para comunicações em áreas internas de edificações, capaz de transmitir dados. No caso deste trabalho, serão os dados referentes às correntes geradas no rotor de um motor de indução trifásico, a uma distância de

aproximadamente cinco metros, para o componente responsável por tratar estes dados, e devolvê-los em forma de informação gráfica para o operador.

2 MOTIVAÇÃO

Baseado no número de vagas ofertadas nas disciplinas ministradas no Laboratório de Máquinas e Acionamentos Elétricos da UFSC (LABMAQ), notou-se que cerca de 130 discentes por semestre, realizam estudos e experimentos utilizando motores elétricos dentro do ambiente.

Pela inexistência de instrumentos adequados para a medição da corrente de rotor bobinado dos motores trifásicos do laboratório, viu-se necessária a implementação de um projeto capaz de fornecer os dados deste componente para o estudo dos experimentos realizados, de modo a agregar maior riqueza de dados e segurança para os experimentos desenvolvidos no LABMAQ, enriquecendo o conhecimento para a formação dos futuros profissionais de engenharia elétrica.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL.

Este trabalho tem por objetivo principal analisar o desempenho de antenas helicoidais com radiação omnidirecional e direcional, na frequência de 433 MHz, como uma possível solução para transmissão de dados referentes à medição de corrente nos rotores para o dispositivo receptor, programado para tratar e reproduzir essas informações em forma gráfica, para um display ou celular, complementando os experimentos realizados no LABMAQ, possibilitando maior compreensão dos estudantes sobre os rotores de máquinas de indução trifásicas.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- a) Introduzir conceitos básicos relacionados a motores de indução trifásicos;
- b) Introduzir conceitos básicos relacionados a antenas helicoidais;

- c) Calcular as dimensões adequadas de duas antenas helicoidais, uma operando em modo normal e outra em modo axial, a serem implementadas para a faixa de frequências de 433 MHz;
- d) Simular a operação das antenas, com as dimensões calculadas, com o auxílio do software gratuito MMANA-GAL;
- e) Avaliar os resultados das simulações, comparando os dois modos de operação da antena helicoidal;
- f) Definir o modo de operação com melhor rendimento e aplicabilidade.

4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho foi dividido em introdução, motores elétricos de indução, antenas, frequência de operação da antena, aquisição do sinal, resultados e considerações finais.

A “Introdução” apresenta o contexto em que o trabalho se enquadra. “Motores elétricos de indução” apresenta uma breve revisão dos conceitos básicos relacionados ao tema. “Antenas” apresenta o conceito destes equipamentos e o estudo de antenas helicoidais. “Frequência de operação da antena” apresenta o uso da frequência de 433 MHz escolhida para o projeto. “Método de aquisição do sinal” trata de parte inicial do projeto, em que será necessário o uso da antena helicoidal para transmissão. “Resultados” apresenta os cálculos e da comparação entre os resultados oriundos das simulações. Por fim, “Conclusão” apresenta algumas conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

5 MOTORES ELÉTRICOS DE INDUÇÃO

5.1 MÁQUINAS ELÉTRICAS DE CORRENTE ALTERNADA

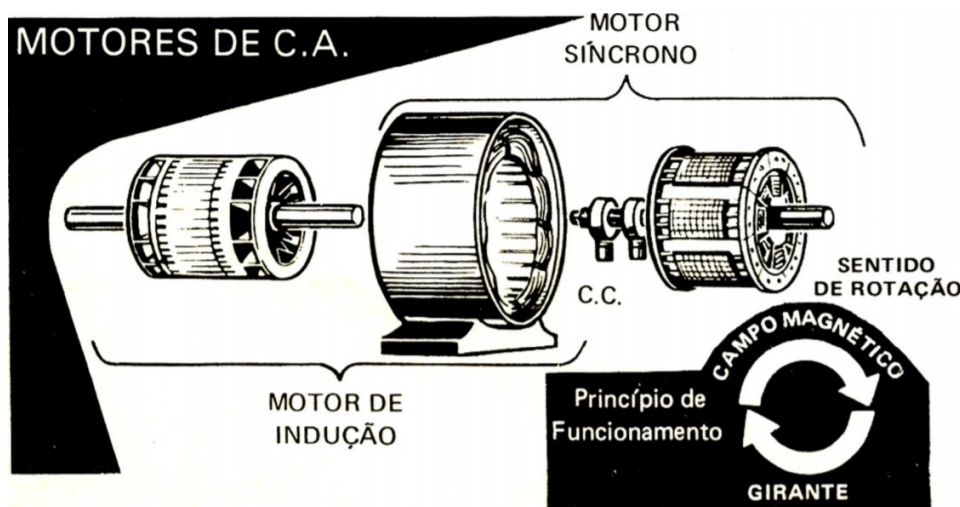
O objetivo deste capítulo é introduzir e discutir alguns dos princípios que fundamentam o funcionamento das máquinas elétricas de indução.

Em máquinas rotativas, as tensões são geradas nos enrolamentos ou em um grupo de bobinas, quando estas giram mecanicamente dentro de um campo magnético, ou o campo magnético gira mecanicamente próximo aos enrolamentos, ou ainda, nas situações em que o circuito magnético é projetado de modo que a relutância varie com a rotação do rotor (FITZGERALD, 2014).

Um grupo dessas bobinas, conectadas em conjunto, é denominado enrolamento de armadura. Em máquinas de corrente alternada (CA), estes enrolamentos alojam-se geralmente na parte estacionária do motor, conhecida como estator.

As máquinas CA tradicionais classificam-se em duas categorias: síncronas e de indução, como ilustrado na figura 1.

Figura 1 - Principais tipos de motores de corrente alternada (indução e síncrono).



Fonte: Hélio Henrique, 2014.

Em máquinas de indução, as correntes são induzidas nos enrolamentos do rotor por meio da combinação da variação, no tempo, das correntes de estator e do movimento do rotor em relação ao estator. Os enrolamentos do estator são semelhantes aos de uma máquina síncrona. Entretanto, o que as difere é o fato de nas máquinas de indução, os enrolamentos do rotor serem eletricamente curto-circuitados, muitas vezes, não apresentarem conexões externas (CHAPMAN, 2013).

Diferentemente de uma máquina síncrona, onde rotor é excitado com corrente contínua, fazendo com que rotacione em sincronismo com a onda de fluxo produzida pelas correntes CA de armadura, os enrolamentos do rotor de uma máquina de indução não são excitados por uma fonte externa. Suas correntes são induzidas nos enrolamentos curto-circuitados do rotor quando este atravessa a onda de fluxo da armadura síncrona em relação à frequência da rede de alimentação.

Como as correntes do rotor são produzidas por indução resultante da ação de transformador a partir dos enrolamentos do estator, uma máquina de indução pode ser vista com um transformador genérico, no qual a potência elétrica é transformada entre rotor e estator, juntamente com uma mudança de frequência e um fluxo de potência mecânica. Embora exista a possibilidade de usar uma máquina de indução como motor ou gerador, há muitas desvantagens de usá-la como gerador e, por este motivo, raramente é usada como tal. Entretanto, nos últimos anos, verificou-se que os geradores de indução são bem adequados em aplicações que envolvem energia eólica (FITZGERALD, 2014).

5.2 MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO BOBINADO

Como foi apresentado anteriormente, no motor de indução a corrente alternada é fornecida diretamente à armadura localizada no estator, ao passo que o campo no rotor, recebe a corrente por indução, como em um transformador, a partir do estator.

Quando a excitação é feita por uma fonte trifásica equilibrada, um campo magnético é produzido no entreferro, girando na velocidade síncrona. Essa velocidade é determinada pelo número de polos da armadura e pela frequência da rede à qual a armadura está conectada.

O motor de indução trifásico opera geralmente com uma velocidade constante, que varia ligeiramente com a carga mecânica aplicada ao eixo. Devido à sua simplicidade e robustez, é um motor muito utilizado, sendo adequado para quase todos os tipos de máquinas acionadas encontradas na prática (WEG, 2015).

O motor de indução trifásico pode ser classificado em dois tipos de rotores: o modelo de rotor gaiola de esquilo e o rotor bobinado. Este último é o rotor presente na máquina deste estudo, ilustrada na figura 2.

Figura 2 - Motor de indução trifásico

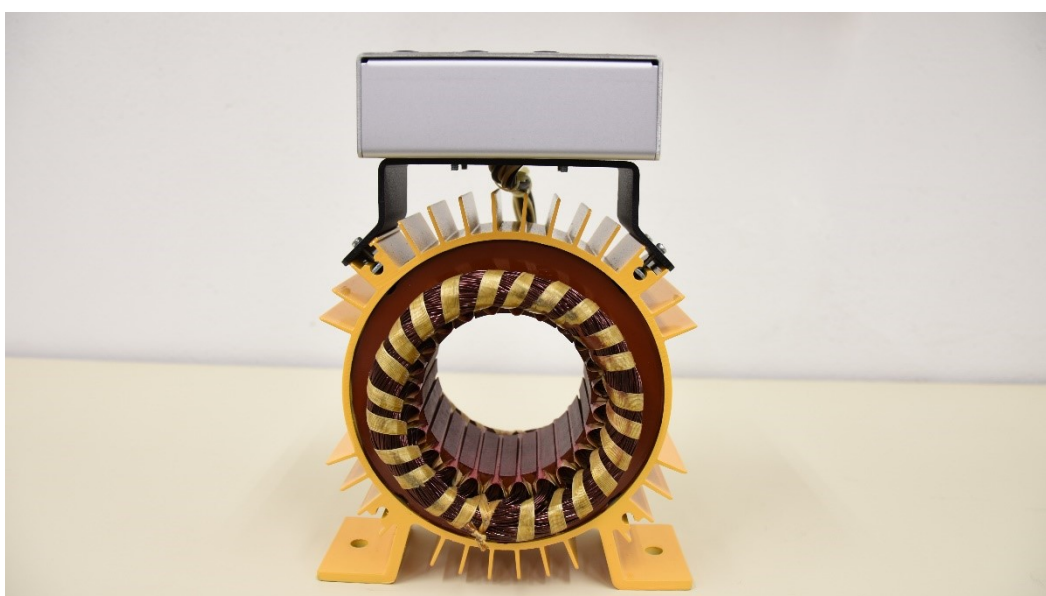


Fonte: Autor

5.3 O ESTATOR

Estator, mostrado na figura 3, é descrito como a parte estacionária de um motor ou gerador elétrico e é o responsável pela indução magnética. É em suas bobinas que é formado o campo magnético capaz de induzir uma corrente no rotor. O estator é formado basicamente por ferro tratado termicamente e dotado de ranhuras no seu interior, onde são alojadas as bobinas. Entretanto, o foco deste trabalho será na corrente produzida no rotor.

Figura 3 - Estator de um motor de indução.



Fonte: Registro de Cristian Mazzola Franzoi.

O rotor é construído por chapas de material magnético, e recebe o enrolamento de campo, cujas espiras são colocadas em ranhuras como mostra a figura 4.

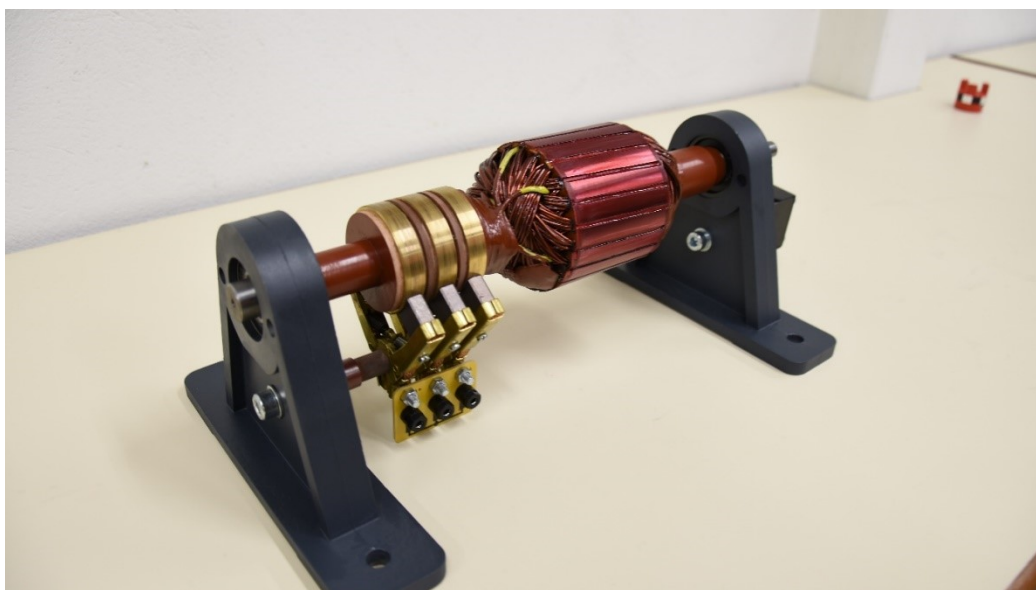
A maneira como esse enrolamento é construído determina o número de polos do motor, entre outras características operacionais. Seus terminais são estendidos até a caixa de terminais, onde é feita a conexão com a rede elétrica para sua alimentação.

5.4 O ROTOR BOBINADO

O rotor enrolado ou bobinado é constituído por um núcleo ferromagnético laminado, sobre o qual são alojadas as espiras que constituem o enrolamento trifásico, semelhante ao estator, tendo o mesmo número de polos (FITZGERALD, 2014).

Um rotor bobinado, mostrado na figura 4, é envolvido por um conjunto de enrolamentos trifásicos isolados, de forma semelhante aos enrolamentos do estator. As fases do rotor são geralmente ligadas em estrela e suas terminações são ligadas aos anéis deslizantes no eixo do rotor. Seus enrolamentos não estão ligados a nenhuma fonte de alimentação. Há também escovas apoiadas nos anéis deslizantes, por meio das escovas estes três anéis ligam-se externamente a um reostato de partida, trifásico, ligadas também em estrela. Deste modo, os enrolamentos do rotor ficam em circuito fechado, isolados da rede elétrica.

Figura 4 – Rotor bobinado.



Fonte: Registro de Cristian Franzoi Mazzola.

A função do reostato de partida, mostrado na figura 5, é reduzir as correntes de partida elevadas e, ao mesmo tempo, elevar o torque de partida, possibilitando a partida de cargas pesadas, no caso de motores de elevada potência. À medida que o motor acelera, a resistência do reostato vai sendo progressivamente reduzida, até ser zerada, na velocidade nominal do motor, quando o motor passa a funcionar no seu

regime nominal. Assim, ao entrar no regime nominal, o motor de rotor bobinado também funciona com os elementos do rotor em curto-circuito, tal como o motor de rotor em gaiola de esquilo, bem mais comum, mas que não é objeto deste estudo (WEG, 2015).

Ainda segundo (WEG, 2015), o motor de indução de rotor bobinado substitui o de rotor em gaiola de esquilo em potências muito elevadas, pois possibilita partir cargas com torque linear e/ou elevado momento de inércia, através do abaixamento da corrente de arranque, o que é permitido pela configuração do rotor e o uso do reostato de partida que propicia o aumento do torque de partida. Apesar de ser utilizados em casos com velocidades constantes de serviço, os motores de indução com rotor bobinado são também usados em velocidades variáveis.

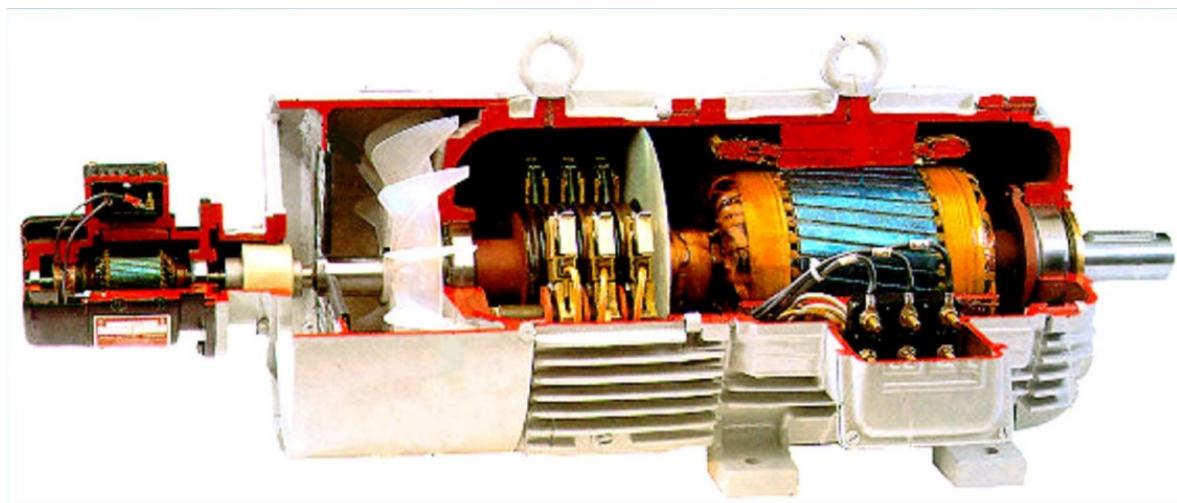
Figura 5 – Reostato de partida.



Fonte: Autor

Resumidamente, o rotor do motor de indução é o componente que gira e é o responsável em aplicar a energia elétrica transformada em energia mecânica na carga. No motor de indução, encontra-se envolvido por uma carcaça, conforme pode ser visto no corte no motor de indução ilustrado na figura 6.

Figura 6 – Corte transversal no motor trifásico.



Fonte: Prof. Hélio Henrique, 2014.

5.5 FUNCIONAMENTO DE UM MOTOR DE INDUÇÃO.

Para o funcionamento de motores de indução trifásicos, segundo Chapman (2013), são aplicadas tensões trifásicas no estator, resultando na circulação de um conjunto de correntes trifásicas nele. Estas correntes são responsáveis por gerar um campo magnético que gira. A velocidade de rotação do campo magnético pleno é dada por (5.1) (Toro,1990).

$$n_s = \frac{120 \times f_s}{p} \text{ (rpm)} \quad (5.1)$$

Onde:

n_s é a velocidade síncrona, dada em rotações por minuto (rpm).

f_s é a frequência das tensões do sistema aplicado ao estator, em Hertz.

p é o número de polos da máquina.

5.6 O ESCORREGAMENTO DO ROTOR

Para entender o comportamento de um motor de indução, devemos compreender o que é o escorregamento do motor. Segundo Del Toro (1990), o termo escorregamento é usado para descrever o que um observador localizado no campo do estator vê olhando em direção ao campo magnético girante produzido na armadura(estator). Ele se percebe escorregando para trás, ou seja, o campo girante gira mais rápido que o rotor, ou ainda, o rotor “escorrega” em relação ao campo girante.

O comportamento de um motor de indução depende diretamente da tensão e da corrente do rotor, o que torna lógico falar em velocidade relativa. Pode-se definir o movimento relativo do rotor e dos campos magnéticos de duas maneiras. Uma delas é a *velocidade de escorregamento*, definida como a diferença entre a velocidade síncrona e a velocidade do rotor (CHAPMAN, 2013), conforme (5.2).

$$n_{esc} = n_s - n_m \quad (5.2)$$

Onde:

n_{esc} = Velocidade de escorregamento da máquina

n_s = Velocidade dos campos magnéticos

n_m = Velocidade mecânica do eixo

A outra forma de descrever o movimento relativo é através do *escorregamento*, que é a velocidade relativa expressa por unidade ou porcentagem. O escorregamento (S) é definido por (5.3):

$$S = \frac{n_{esc}}{n_s} \quad \text{ou} \quad S = \frac{n_s - n_m}{n_s} \quad (5.3)$$

Uma observação importante a ser feita aqui é que quando o rotor estiver girando em velocidade síncrona, o escorregamento é nulo ($S = 0$), ao passo que, quando o rotor estiver travado, tem-se o escorregamento máximo ($S = 1$). Portanto, para o motor, os valores de escorregamento sempre estarão entre 0 e 1.

A partir dos valores de escorregamento e da velocidade síncrona do motor, pode-se expressar a velocidade mecânica do motor a partir de (5.4).

$$n_m = (1 - S)n_s \quad (5.4)$$

5.7 A FREQUÊNCIA DAS CORRENTES NO ROTOR

O funcionamento de um motor de indução consiste em induzir tensões e correntes no rotor através das fornecidas pelo sistema no estator. Desta forma, podemos fazer uma analogia com um transformador, em que o estator seria o primário induzindo uma tensão no rotor, que seria o secundário. Esta analogia nos permite muitas vezes chamar um motor a indução de *transformador rotativo*. Entretanto, diferentemente do transformador, as frequências do estator e do rotor não são necessariamente iguais.

Quando trabalhamos com o rotor travado, o escorregamento será máximo e a frequência das correntes no rotor será igual à do estator. Por outro lado, quando o rotor estiver trabalhando na velocidade síncrona e o escorregamento for nulo, a frequência das correntes no rotor também será nula. De maneira geral, para qualquer valor de escorregamento com $0 < S < 1$, a frequência das correntes no rotor depende da velocidade do campo magnético n_s da velocidade do rotor n_m .

O movimento relativo entre o fluxo do estator e os condutores do rotor induz tensões de frequência f_{rot} . Então, a frequência das correntes no rotor terão também frequência f_{rot} , podendo ser expressas em função do escorregamento (FITZGERALD, 2014), dadas por (5.5).

$$f_{rot} = S f_s \quad (5.5)$$

A partir disto, é importante destacar que as correntes induzidas no rotor terão uma frequência inferior a 60 Hz, com exceção de quando o rotor estiver travado. Desta forma, não é possível obter com muitos detalhes as informações das correntes geradas nele ao longo de sua partida até sua velocidade síncrona com um simples amperímetro alicate.

6 ANTENAS

Este capítulo será dedicado ao estudo das antenas helicoidais. No entanto, é oportuno que se fale um pouco sobre o que é e como surgiu o conceito de antenas de modo geral, afinal não se conhece verdadeiramente nada sem antes saber sua origem.

A história das antenas, brevemente descrita por William H. Emerson, remete a James Clerk Maxwell, que foi o responsável por unificar as teorias da eletricidade e do magnetismo e representou, eloquentemente, suas relações por meio de um conjunto de equações profundas, mais conhecidas como Equações de Maxwell. Este trabalho foi publicado pela primeira vez em 1873 (GILLETTE, 1977).

A primeira antena foi criada, em 1886, pelo físico Heinrich Rudolf Hertz, para estudo e desenvolvimento das teorias eletromagnéticas, anteriormente propostas por Maxwell, ainda no século XIX (Balanis, 2005). Hertz foi capaz de produzir em seu laboratório, em um comprimento de onda de 4 m, uma faísca no *gap* de um dipolo transmissor com comprimento igual a meio comprimento de onda ($\lambda / 2$), que foi, então, detectada como uma centelha no *gap* de um *loop* próximo. Foi somente em 1901 que Guglielmo Marconi foi capaz de enviar sinais a grandes distâncias. Ele realizou, em 1901, a primeira transmissão transatlântica de Poldhu, na Cornualha, Inglaterra, para São João da Terra Nova, no Canadá (Nobel Lectures, 2020).

Balanis, em seu livro, comenta que a antena transmissora criada por Marconi consistia em 50 fios verticais, na forma de um ventilador, conectados ao solo por meio de um transmissor de centelha. Os fios eram sustentados horizontalmente por um fio estaiado entre dois postes de madeira de 60 m. A antena receptora, em São João da Terra Nova, era um fio de 200 m, puxado e sustentado por uma pipa. Este foi o início da era da antena. Guglielmo Marconi criou o telégrafo sem fio e recebeu o prêmio Nobel de Física pelas suas diversas contribuições à radiocomunicação (Nobel Lectures, 2020).

O estudo sobre as antenas foi se desenvolvendo ao longo dos anos e, com isso, as antenas passaram a ser construídas em diferentes formas e tamanhos para atenderem às diversas aplicações quanto à sua diretividade e recepção, como podemos encontrar em *Wave and Antennas* de Orfanidis (ORFANIDIS, 2016). Assim, passamos a conhecer as antenas dipolo, monopolo, parabólicas, helicoidais, impressas, log-periódicas, fractais etc.

Em resumo, podemos descrever as antenas como dispositivos que fazem a transição entre propagação no espaço livre e nos condutores (cabo coaxial, guia de onda, linha bifilar etc.). É um elemento linear passivo e recíproco, responsável por receber ou transmitir a energia eletromagnética na forma de ondas de rádio.

6.1 ANTENAS HELICOIDAIS

As antenas helicoidais são amplamente utilizadas, seja para sistemas simples como telefonia, *wireless* e sistemas de rádios pessoais, até para aplicações militares e satélites. Foi John Daniel Kraus, um físico americano, o primeiro a descrever antenas em forma de hélice.

Júlio C. de Oliveira em sua dissertação, cita um bom exemplo que justifica o uso e apresenta a vantagem desse modelo geométrico de antena. É o problema encontrado em satélites, devido ao efeito chamado "*Spin Rotation*". Esse efeito é provocado pelo giro do satélite em torno de seu próprio eixo axial, fazendo com que a polarização do sinal varie entre horizontal e vertical constantemente, prejudicando sua recepção na terra.

A antena de geometria helicoidal, como mostrado na figura 7, pode ser projetada para radiar campos com polarização circular, evitando os efeitos dessa mudança constante na polarização resultante desta rotação do satélite. Isso melhora a recepção do sinal em terra e, por isso, justifica o seu uso.

Atualmente, existem diversos projetos de antenas helicoidais. Em capítulo futuro, será feita uma análise através de cálculos e simulações para encontrar o projeto mais adequado para a geometria de uma antena helicoidal que trabalha em 433 MHz, que será usada para transmissão dos dados obtidos do rotor do motor trifásico nos ensaios no LABMAQ, viabilizando ao estudante melhor entendimento do seu funcionamento, por meio das informações recebidas pela rede de antenas.

Figura 7– Antenas Helicoidais do *Jet Propulsion Laboratory* (JPL).

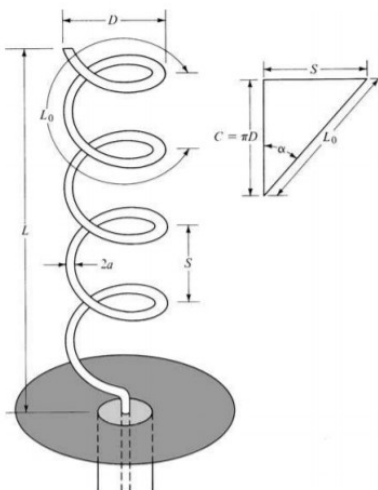


Fonte: NASA/JPL, “In the beginning”.

6.1.1 Geometria de uma antena helicoidal

As antenas helicoidais apresentam uma configuração simples e prática, constituído de um fio condutor enrolado na forma de uma rosca, formando uma hélice. Geralmente, a hélice é usada junto a uma superfície condutora (ou plano de terra), que pode assumir diversas formas. No entanto, a mais comum é a superfície plana, conforme mostrado na figura 8.

Figura 8 – Parâmetros de uma Antena Helicoidal e superfície plana.



Fonte: Balanis, 2005.

Na figura 8, os parâmetros da antena são (KRAUS, 1947):

- N - número de espiras;
- D - diâmetro da hélice;
- a - raio do fio da hélice;
- C - circunferência da hélice ($C = \pi D = 2\pi a$);
- S - *Pitch* ou Passo ($S = C \times \tan \alpha$);
- α - ângulo de passo ($\alpha = \arctg(S/C)$);
- L_0 - comprimento do fio de uma espira ($L_0 = \sqrt{C^2 + S^2}$);
- L - Altura da Hélice ($L = NS$);
- L_w - comprimento da bobina Helicoidal ($L_w = NL_0$).

Para que o funcionamento seja satisfatório, o diâmetro da superfície condutora, no caso dela ser circular, deve ser de pelo menos três quartos do comprimento da onda ($3\lambda/4$) de operação da antena. No caso de uma superfície plana retangular, são os seus lados que devem possuir esta mesma proporção. Vale ressaltar que a superfície plana é apenas um dos modelos existentes (BALANIS, 2005). Kummer e Gillespie (1978) apresentam outras alternativas de construção para superfícies condutoras, como as formas de cavidade cilíndrica e cavidade tronco (de cone ou pirâmide).

Além disso, a hélice geralmente está conectada ao condutor central de uma linha de transmissão coaxial no ponto de alimentação, com o condutor da linha ligado à superfície condutora (plano de aterramento), pode ser visto na figura 8.

A título de curiosidade, facilmente pode ser observado que tanto as antenas *loop* como as antenas lineares são casos particulares de antenas helicoidais. Se for pensada em uma antena helicoidal qualquer e se achatar o espaçamento entre suas hélices até que esse espaçamento seja nulo ($S = 0$), chega-se à geometria de uma antena em *loop*. Por outro lado, se esta antena for esticada até que o diâmetro da hélice D seja nulo, será obtida uma antena linear (STUTZMAN, 1998).

6.1.2 Modos de operação

As características da diretividade de radiação das antenas são diferentes, umas das outras de acordo com a variação de suas propriedades geométricas em relação ao comprimento de onda. A radiação de uma certa antena pode ser descrita, principalmente, de duas formas principais: omnidirecional ou direcional (Balanis,2014).

A padronização de termos feita pelo IEEE define uma antena omnidirecional como aquela que possui um padrão essencialmente não direcional em um determinado plano da antena e um padrão direcional em qualquer plano ortogonal, com seu diagrama de radiação espalhado para todas as direções ao redor de seu eixo. Já a direcional é uma antena com a propriedade de irradiar ou receber ondas eletromagnéticas de forma mais eficaz em algumas direções do que em outras. O seu diagrama de radiação tem perfil de concentração em uma só direção, com um determinado ângulo de abertura como limite de sua abrangência.

Antenas helicoidais podem operar em diversos modos de irradiação, conforme descrito por John Kraus, de acordo com a forma geral do seu diagrama de radiação de uma antena. A seguir estão discutidos os dois modos principais neste tipo de antena, a saber, normal e axial.

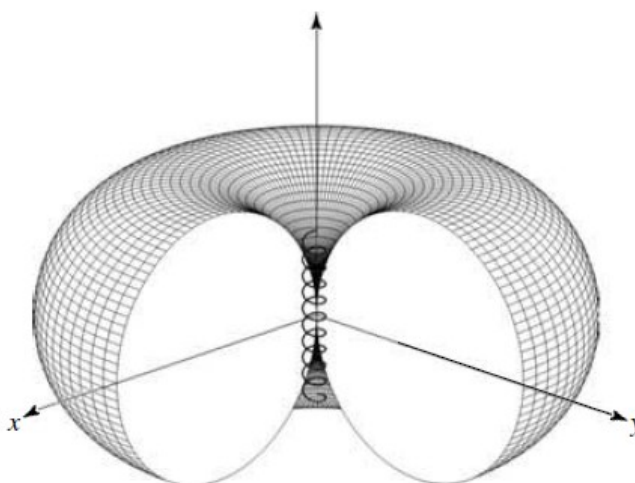
Kraus explica que o modo de operação normal (R_n) apresenta a característica de radiação descrita anteriormente como omnidirecional, ou seja, o campo é máximo na direção normal ao eixo da hélice e praticamente nulo ao longo do eixo, sendo a polarização circular para uma dada relação entre o espaçamento entre espiras e o seu diâmetro. Para o funcionamento neste modo, as dimensões da hélice devem ser relativamente pequenas, comparadas ao comprimento de onda ($L \ll \lambda$). A largura de banda da antena, nestes casos é pequena.

O autor ainda relata em "*The Helical Antenna*", que modo axial ou de feixe (R_a), para o qual o diagrama de radiação aponta na direção do eixo da hélice com polarização circular ou elíptica, é alcançado aumentando-se a circunferência C da hélice (figura 8) até que ela seja da ordem de um comprimento de onda λ . Este modo é geralmente o mais prático, porque pode atingir polarização circular em uma largura de banda mais ampla (geralmente 2:1) e é mais eficiente.

6.1.2.1 Operação no modo normal (Rn)

Para operação em modo normal, conforme a figura 9, as dimensões da hélice devem ser pequenas, quando comparadas com o comprimento de onda, isto é, $D \ll \lambda$ e L geralmente $\ll \lambda$.

Figura 9 – Padrões de amplitude tridimensionais representativos de uma hélice operando no modo normal.



Fonte: (Balanis, 2014).

A hélice no modo normal é eletricamente pequena, o que faz com que a corrente seja assumida constante em todo o seu comprimento. O padrão de campo distante torna-se independente do número de voltas e, por esse motivo, pode-se obtê-lo através da análise de uma única volta (KRAUS, 1949). Nessas condições, a antena pode ser aproximada como a combinação de um laço pequeno e um dipolo ideal.

Nesse caso, Kraus aproxima a contribuição do dipolo para o campo elétrico em um ponto distante da antena por (6.1)

$$\vec{E}_D = j\omega\mu IS \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} \sin(\theta)\hat{\theta}, \quad (V/m) \quad (6.1)$$

e o campo gerado pelo laço é dado por (6.2).

$$\vec{E}_L = \eta \beta^2 D^2 I \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} \sin(\theta) \hat{\phi}, \quad (V/m) \quad (6.2)$$

Onde,

ω é a frequência angular de operação da antena;

μ é a permeabilidade magnética do meio;

η é a impedância intrínseca do meio;

$k = \beta$ é o número de onda.

Fazendo a soma vetorial de (6.1) e (6.2), obtém-se o campo total gerado pela antena. A análise de (6.1) e (6.2) demonstra que ambas as componentes possuem campo nulo na direção ao longo do eixo ($\theta = 0$). Devido à existência do operador j multiplicando apenas (6.1), nota-se que as fases dos campos estão em quadratura (KRAUS, 1949), ou seja, as componentes do campo elétrico gerado pela antena estão defasadas de 90° .

Balanis afirma que, nesse caso, o campo irradiado pela antena tem polarização elíptica e a razão axial entre os eixos da elipse é dado por (6.3)

$$|AR| = \frac{|E_D|}{|E_L|} = \frac{4\omega\mu S}{\mu\omega(2\pi/\lambda)\pi D^2} = \frac{2S\lambda}{\pi^2 D^2} \quad (6.3)$$

A polarização será circular caso a razão axial seja unitária. Essa condição é obtida se a condição mostrada em (6.4) for atendida (Balanis, 2014).

$$C = \pi D = \sqrt{2S\lambda} \quad (3.4)$$

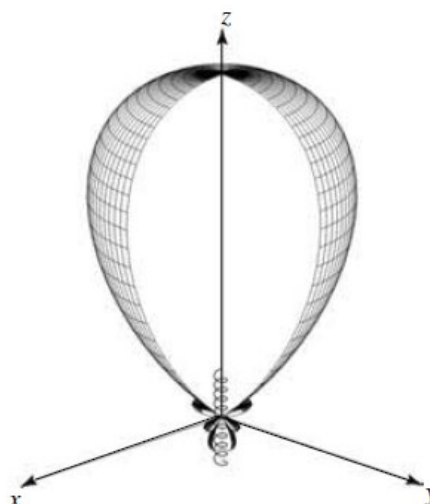
Assim, o ângulo de passo necessário para a polarização circular (α_{cp}) é dado por (6.5) (OLIVEIRA, 2013).

$$\alpha_{cp} = \sin^{-1} \left[\frac{-1 + \sqrt{1 + (L/\lambda)^2}}{L/\lambda} \right] \quad (3.5)$$

6.1.2.2 Operação no modo axial

No modo de operação axial, há apenas um lóbulo principal, e sua intensidade máxima de radiação está ao longo do eixo da hélice, com os lobos menores em ângulos oblíquos ao eixo, conforme mostrado na figura 10.

Figura 10 – Padrões de amplitude tridimensionais representativos de uma hélice operando no modo axial.



Fonte: Balanis, 2014.

Para excitar este modo, o diâmetro D e o espaçamento S devem ser grandes frações do comprimento de onda. Para alcançar a polarização circular, a circunferência da hélice deve estar no intervalo $3/4 < C/\lambda_0 < 4/3$ ($C/\lambda_0 = 1$ próximo do ótimo) e o espaçamento aproximadamente igual a $\lambda_0/4$. O ângulo de passo deverá estar entre $12^\circ \leq \alpha \leq 14^\circ$ (KRAUS, 1947).

Como já dito anteriormente, quando se trata da geometria da antena, é comum que se encontre o conjunto antena mais o plano de aterramento. Neste caso, o diâmetro da superfície condutora deve ser de pelo menos $\lambda_0/2$, conectada ao condutor externo da linha coaxial. As dimensões da hélice, para este modo de operação, não são tão críticas, resultando em uma largura de banda maior. Por este motivo, são

possíveis outros tipos de alimentação (como guias de onda e barras dielétricas), especialmente em frequências de micro-ondas.

A impedância de entrada de uma hélice que irradia no modo axial é predominantemente resistiva, com valores variando entre 100 e 200 ohms. Valores menores, mesmo próximos a 50 ohms, podem ser obtidos com um projeto adequado.

No capítulo que fala sobre o *design* de produção, Balanis traz e discute expressões empíricas, baseadas em muitas medidas, que foram derivadas e são usadas para determinar uma série de parâmetros. É possível definir uma relação empírica que permite determinar a impedância da antena com uma tolerância de impedância de $\pm 20\%$, com a relação mostrada em (6.6) (BALANIS, 2014).

$$R \simeq 140 \frac{C}{\lambda} [\Omega]. \quad (6.6)$$

Com essas características, a largura do feixe principal para meia potência (HPBW, *Half-Power Beamwidth*) é determinada de maneira aproximada (em graus) por (6.7) (BALANIS, 2014).

$$\text{HPBW (graus)} = \frac{52\lambda^{3/2}}{C\sqrt{N \times S}}, \quad (6.7)$$

A largura de feixe entre os primeiros nulos (BWFN, *Beam Width First Nulls*) é dada (em graus) por (6.8).

$$\text{BWFN (graus)} = \frac{115\lambda^{3/2}}{C\sqrt{NS}}. \quad (6.8)$$

Estas expressões são válidas mantendo-se as condições anteriores de α e C e para valores de $N > 3$.

Já a diretividade D_0 da antena helicoidal operando no modo axial é aproximada por (6.9), adimensional.

$$D_0 \simeq 15N \times \frac{C^2 S}{\lambda^3}, \quad (6.9)$$

A razão axial para modo axial é aproximada por (6.10)

$$|AR| \simeq \frac{2N+1}{2N}. \quad (6.10)$$

O valor da relação axial é aproximadamente 1 quando a antena está funcionando em modo axial, significando, desta forma, que a polarização da antena é circular (BALANIS, 2014).

Se for assumido que a antena é feita de um conjunto de N laços idênticos, chega-se ao diagrama de radiação já mostrada na figura 10. Assim, o diagrama da hélice pode ser obtido pelo produto do diagrama de um único laço pelo fator espacial F , dado por (6.11)

$$F = \sin\left(\frac{90^\circ}{N}\right) \times \frac{\sin(N \times \psi/2)}{\sin(\psi/2)} \quad (6.11)$$

O ângulo de fase entre os campos nas direções ϕ e θ é dado por (6.12).

$$\psi = 360^\circ \left[S(1 - \cos(\theta)) + \frac{1}{(2N)} \right] \quad (6.12)$$

Aproximando o campo gerado pelo laço por $\cos(\theta)$, realiza-se uma aproximação simples para o campo gerado por um único laço (KRAUS, 1997). Nesse caso, o diagrama de radiação pode ser aproximado por (6.13).

$$E = \left(\sin\left(\frac{90^\circ}{N}\right) \times \frac{\sin(N \times \psi/2)}{\sin(\psi/2)} \times \cos(\theta) \right) = F \times \cos(\theta) \quad (6.13)$$

7 FREQUÊNCIA DE OPERAÇÃO DA ANTENA

Existem diversas formas de construção de rede sem fio, tais como: GPRS, *Bluetooth*, LAN sem fio 802.11 (Wi-Fi), transmissão de dados infravermelhos (IrDA), comunicação sem fio de 433 MHz e outras. (QINGYUN, 2018). As formas de comunicação sem fio acima têm suas próprias características ou são baseadas em requisitos especiais de velocidade de transmissão, distância e consumo de energia.

Na Europa, as bandas de frequência ISM 433,050-434,790 MHz são amplamente utilizadas para aplicações de baixa taxa de dados, como *Wireless Sensor Network* (WSN) e controles remotos (*ERC Recommendation*, 2004). Com o rápido desenvolvimento da comunicação sem fio, o tamanho do sistema sem fio operando na banda de frequência ISM 433 MHz também deve ser pequeno e compacto. Portanto, reduzir o tamanho da antena desempenha um papel fundamental no projeto (WENDONG, 2011).

No Brasil, esta faixa de frequência é da mesma forma qualificada pela Anatel na resolução N° 365, de 2004, que regulamenta o uso de equipamentos de radiocomunicação de radiação restrita. Para o uso desta faixa de radiofrequência em ambientes internos de edificações, a regulamentação está na resolução N° 365, em seu artigo 9°, inciso 5°: “A utilização da faixa de radiofrequências de 433 MHz a 435 MHz por equipamentos de radiação restrita em áreas internas de edificações poderá ser feita com potência irradiada limitada ao valor máximo de 10 mW (e.i.r.p)”. Reafirma estas condições na resolução N° 680, aumentando-se a faixa de uso para 410 – 608 MHz.

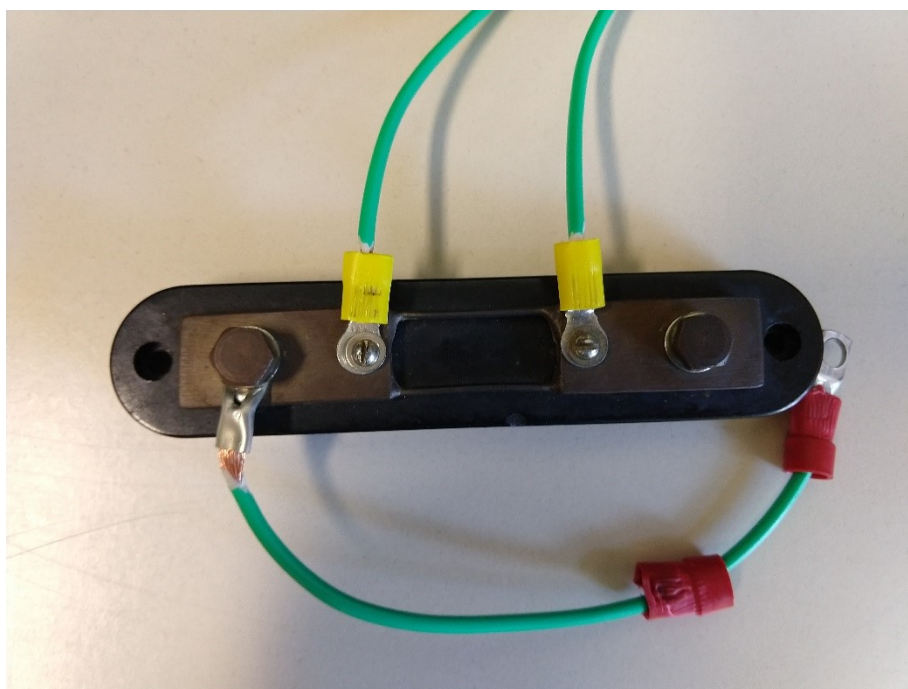
No âmbito da automação residencial, surgiram protocolos com características peculiares, como o baixo consumo energético, pequeno alcance entre os seus pontos de acesso (*Hot spots*) e taxas de transmissões pequena. Como exemplo, tem-se o módulo de rádio frequência (RF) de 433 MHz, que possui uma infraestrutura mais simples e barata, o que facilita sua implementação.

8 MÉTODO DE AQUISIÇÃO DO SINAL

A fim de obter as corrente do rotor sem causar desbalanceamento nos parâmetros do circuito trifásico do motor, será utilizado um resistor *shunt*, mostrado na figura 11, com especificação de corrente de 20 A e tensão de 60 mV, em série com uma das fases do banco de resistores, mostrado na figura 12, que por sua vez, estão ligados aos terminais das escovas do motor de indução.

Para se obter um sinal mais limpo e legível da tensão e, conseqüentemente, da corrente no rotor, foi acoplado um amplificador analógico e um filtro digital. Isto é necessário, pois as tensões obtidas são na escala de milivolts. Assim, qualquer amplificação que se faça para obter um melhor sinal, amplificará também os ruídos que compõem o mesmo.

Figura 11 – Resistor *Shunt* (60 mV, 20 A).



Fonte: Foto registrada pelo autor.

Figura 12 – Conexão Rotor- Reostato.



Fonte: Foto registrada pelo autor.

O motor de indução trifásico em que o projeto será implementado possui em seus dados de placa a informação de que sua velocidade nominal é de 1740 rpm, trabalhando a uma frequência de rede igual a 60Hz, o que leva à conclusão que se trata de uma máquina de quatro polos. Assim: concluímos que

$$n_s = \frac{120 \cdot 60}{4} = 1800 \text{ (rpm)}$$

Através da velocidade síncrona da máquina obtida e com a informação da velocidade nominal, pode-se obter a velocidade de escorregamento e, conseqüentemente, o escorregamento da máquina (dado em forma porcentual):

$$n_{esc} = 1800 - 1740 = 60 \text{ rpm}$$

Então,

$$S = \frac{60}{1800} \cdot 100 = 3,33 \%$$

Como se pode perceber, o escorregamento da máquina é muito pequeno. E, como visto anteriormente, a frequência das correntes no rotor depende diretamente do módulo do escorregamento. Desta forma, as frequências de tensão e corrente no rotor são dadas por:

$$f_{rot} = S \cdot f_s$$

$$f_{rot} = 0,033 \cdot 60 = 1,98 \text{ Hz}$$

Como a corrente no rotor possui frequências muito pequenas, abaixo da faixa de funcionamento dos amperímetros alicate, não é possível medir e nem observar suas componentes em um osciloscópio, o que justifica a construção do projeto para obtenção destes dados e aperfeiçoar a aprendizagem nas aulas de laboratório. É importante ressaltar que o objetivo deste trabalho é construir a antena. Os processos de aquisição e tratamento de sinal não são objetos deste estudo. Por isso, os dispositivos de amplificação e filtragem não serão detalhados.

9 RESULTADOS

9.1 PARÂMETROS DO COMPRIMENTO DE ONDA.

Na construção de toda e qualquer antena, o primeiro passo é conhecer a faixa de frequências em que a antena vai operar. Neste trabalho, a frequência deverá estar na faixa de 433 MHz. Essa frequência foi escolhida, dentre muitas destinadas para uso de radiocomunicações internas, principalmente pelo seu amplo uso nessas aplicações, como vimos anteriormente.

O primeiro parâmetro que devemos descobrir é o valor do comprimento de onda λ correspondente a essa frequência, para então projetarmos a antena de forma a otimizar seu funcionamento, como mostra (6.1)

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (9.1)$$

Onde,

c = Velocidade da luz ($3,0 \cdot 10^8$ m/s)

f = Frequência, em hertz

λ = Comprimento de onda, em metros

Substituindo $f = 433$ MHz na expressão, obtém-se λ igual a 0,6928 m. Desta forma, os cálculos para o projeto dos parâmetros da antena vão ser baseados neste comprimento de onda, a fim de se obter um bom funcionamento da comunicação nesta frequência.

9.2 PROJETO NO MODO AXIAL (RA)

Como apresentado na sessão 6.1.2.2, o método fácil de se projetar uma antena helicoidal no modo axial é considerar a circunferência da hélice C aproximadamente igual ao tamanho do comprimento da onda λ , definir um ângulo de passo entre $12^\circ \leq \alpha \leq 14^\circ$ e um espaçamento (passo) próximo a $\lambda/4$.

Partindo destas condições iniciais, tem-se que:

$$C = 69,28 \text{ cm}$$

e como,

$$C = \pi \cdot D$$

Obtém-se:

$$D = \frac{69,28}{\pi} = 22,05 \text{ cm}$$

Ainda, para se obter um espaçamento próximo a $\lambda/4$ para este caso, será considerado um ângulo de passo igual a 14° . Aplicando este valor em (9.2),

$$S = C \cdot \text{tg}(\alpha) \quad (9.2)$$

tem-se que:

$$S = 69,28 \cdot \text{tg}(14^\circ)$$

ou:

$$S = 17,27 \text{ cm}$$

Por fim, resta definir o número de espiras para ser encontrado o tamanho ideal da antena. Também na sessão 6.1.2.2, foi mostrado que as equações apresentadas são válidas para $N > 3$. Por este motivo, serão usadas 12 espiras para este projeto. Desta forma, a partir de (9.3),

$$L = N \times S \quad (9.3)$$

tem-se:

$$L = 12 \times 17,27 = 2,07 \text{ m}$$

9.3 PROJETO NO MODO NORMAL (RN)

Para que uma antena helicoidal opere em modo normal, foi estabelecido na sessão 6.1.2.1 que seus parâmetros deveriam ser pequenos em relação ao comprimento de onda, ou seja, D e L devem ser muito menores que λ .

Para o projeto da antena helicoidal em modo normal, foi usado como base um modelo comercial com $L = 1,55$ cm e $D = 0,53$ cm. A fim de obter uma polarização circular, calcula-se:

$$\alpha = \sin^{-1} \left[\frac{-1 + \sqrt{1 + (1,55/69,28)^2}}{\frac{1,55}{69,28}} \right] = 0,641^\circ$$

Sendo:

$$C = \pi D = 1,66 \text{ cm}$$

$$S = C \times \text{tg}(\alpha) = 0,018 \text{ cm}$$

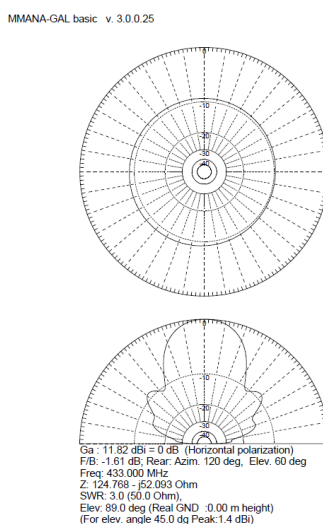
9.4 SIMULAÇÃO

Para realizar a simulação das antenas calculadas e otimizá-las, foi usado o *software* gratuito MMANA-GAL Basic. Essa ferramenta de análise de antenas, baseada no Método dos Momentos, permite a construção da antena desejada ponto a ponto, sendo simulado o funcionamento da antena em locais diversos e otimizadas conforme o parâmetro desejado. Por essa razão, é bastante usada por radioamadores e profissionais que trabalham com o projeto e análise de antenas. A ideia do método consiste em discretizar a geometria da antena, quebrando-a em vários pequenos segmentos. O Método dos Momentos permite resolver as equações de Maxwell numericamente com o objetivo de obter a distribuição de corrente em todas as partes da antena para diferentes frequências. A partir do conhecimento dessas correntes, o programa, então, calcula os parâmetros da antena, como diagramas de radiação, impedância de entrada, relação de onda estacionária e outros.

Para simular o funcionamento das antenas projetadas nas sessões 9.2 e 9.3, considerou-se um ambiente de subúrbio industrial, com o intuito de replicar o ambiente do LABMAQ. O material escolhido para a composição do condutor da antena foi o cobre.

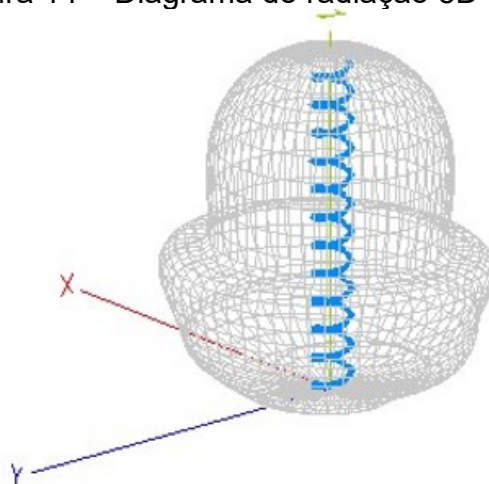
Os resultados estão nas figuras 13 e 14, que mostram os diagramas de radiação (2D e 3D) da antena operando em modo axial, conforme sessão 9.2.

Figura 13 - Diagrama de Radiação da antena operando em modo axial.



Fonte: Simulação realizada pelo autor.

Figura 14 – Diagrama de radiação 3D (modo axial).

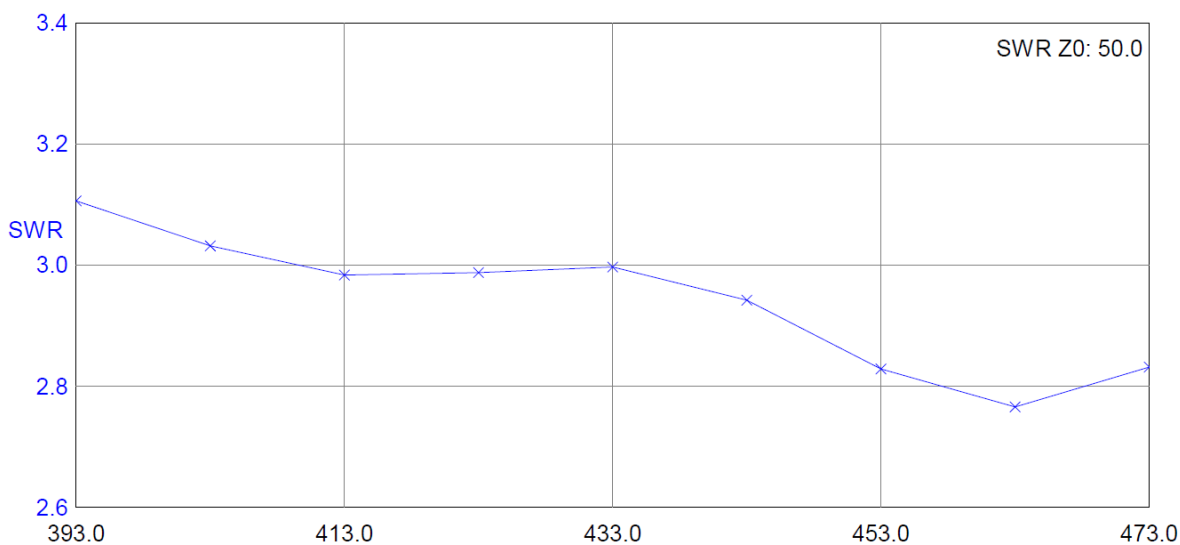


Fonte: Simulação realizada pelo autor.

Pela análise dos gráficos, é possível determinar que, como esperado, a antena está funcionando no modo axial, com máxima radiação na direção do eixo da antena.

A figura 15 apresenta o gráfico da relação de onda estacionária (SWR, *Standing Wave Ratio*), que é a grandeza que permitirá analisar o casamento de impedância da antena com o cabo coaxial a ela conectado.

Figura 15 – Relação de Onda Estacionária x frequência.

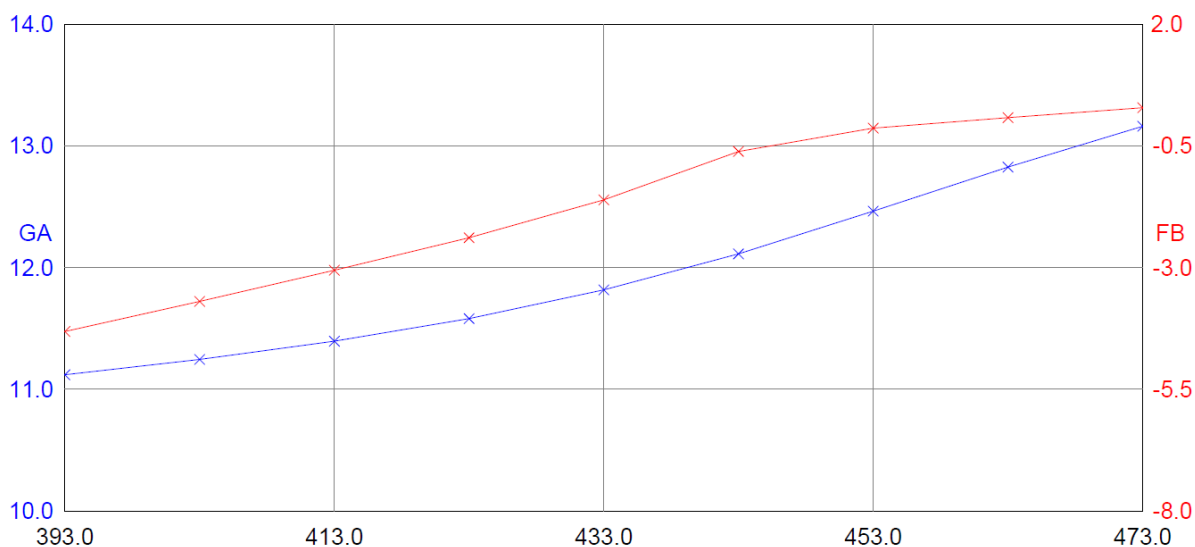


Fonte: Simulação realizada pelo autor.

Analisando o gráfico, é possível concluir que o casamento de impedância, considerando a impedância do cabo coaxial como 50Ω , deve ser corrigido para não prejudicar o funcionamento do equipamento em que esta antena esteja instalada.

O ganho da antena (GA) e a relação frente/costas (F/B) para operação no modo axial são ilustrados nos gráficos da figura 16.

Figura 16 - Ganho (em dBi) e F/B (em dB) x Frequência (MHz).

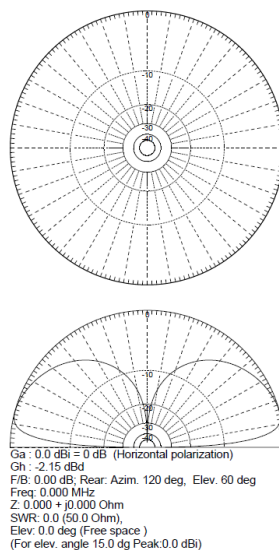


Fonte: Simulação realizada pelo autor.

Pode-se observar que o ganho em relação a uma antena isotrópica (dBi) é relativamente alto na frequência de 433 MHz. Já a F/B não é tão elevada, indicando que a antena irradia muito sinal na direção oposta à direção principal de radiação. Uma possível solução para melhorar a F/B seria usar um plano condutor com diâmetro maior, o que implica no aumento do tamanho e do peso da antena.

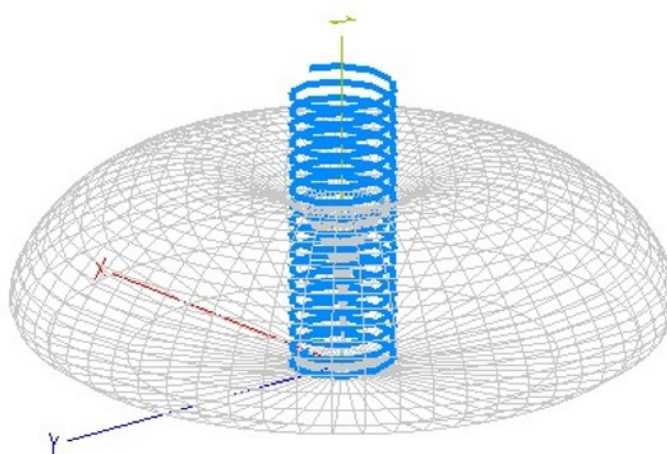
Para operação no modo normal, os resultados estão nas figuras 17 e 18, que mostram os diagramas de radiação (2D e 3D) da antena da Sessão 9.3.

Figura 17 - Diagrama de Radiação da antena operando em modo normal.



Fonte: Simulação realizada pelo autor.

Figura 18 - Diagrama de radiação 3D (modo normal).

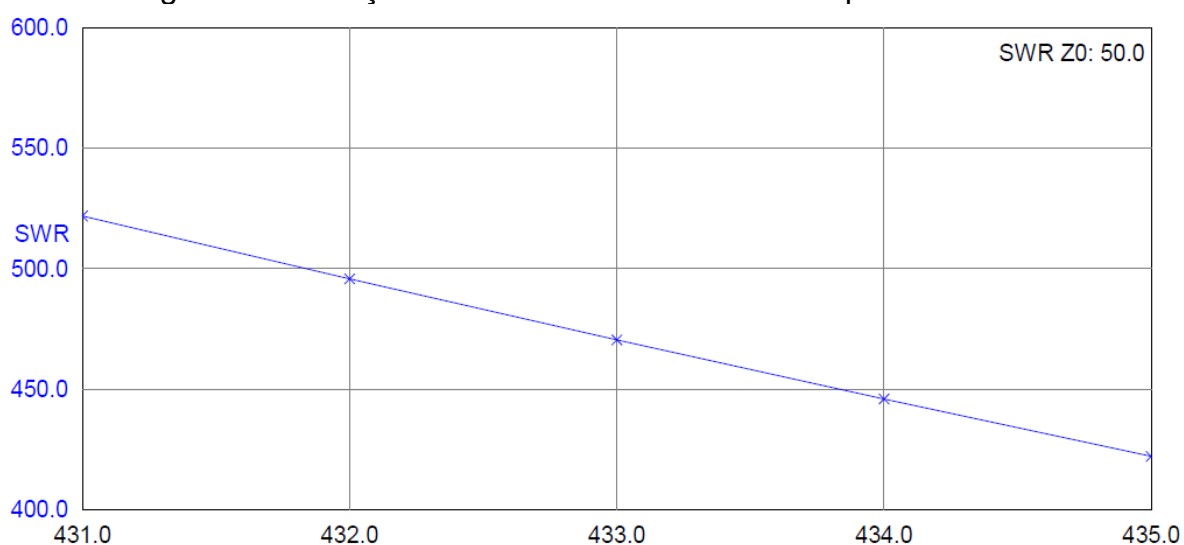


Fonte: Simulação realizada pelo autor.

A partir da análise dessas figuras, pode-se concluir que a antena está funcionando da maneira para qual foi projetada, já que no modo normal (R_n) a direção de máxima radiação é perpendicular ao eixo da antena.

A figura 19 apresenta o gráfico de relação de ondas estacionárias (SWR) para a antena normal projetada anteriormente, operando no modo.

Figura 19 - Relação de Ondas Estacionárias x frequência.

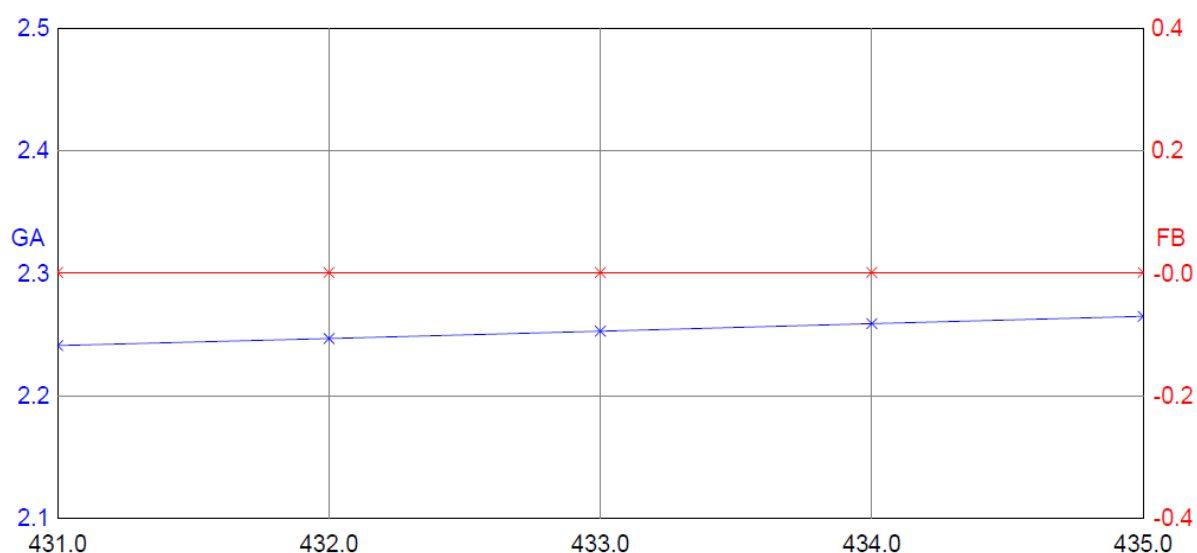


Fonte: Simulação realizada pelo autor.

Através do gráfico na figura 19, pode-se concluir que a construção da antena não é ideal, pelo contrário, passa longe disso. A relação de ondas estacionárias está muito distante do ideal. De fato, um valor muito grande de SWR implica que haverá muita reflexão de potência na conexão entre a antena e o cabo coaxial. Com isso, conclui-se que a antena foi mal projetada e, por isso, não conseguiria operar nesta faixa de frequência.

O ganho da antena, operando em modo normal (em dBi), e a relação frente/costas (F/B, em dB) são ilustrados na figura 20.

Figura 20 - Ganho (em dBi) e F/B (em dB) x Frequência.



Fonte: Simulação realizada pelo autor.

Pode-se observar que o ganho em relação a uma antena isotrópica (dBi) não é tão alto com relação ao modo axial na frequência de 433 MHz. Isso é esperado, já que a antena agora não é mais diretiva, mas sim omnidirecional. Por essa razão, a F/B é nula em toda a faixa.

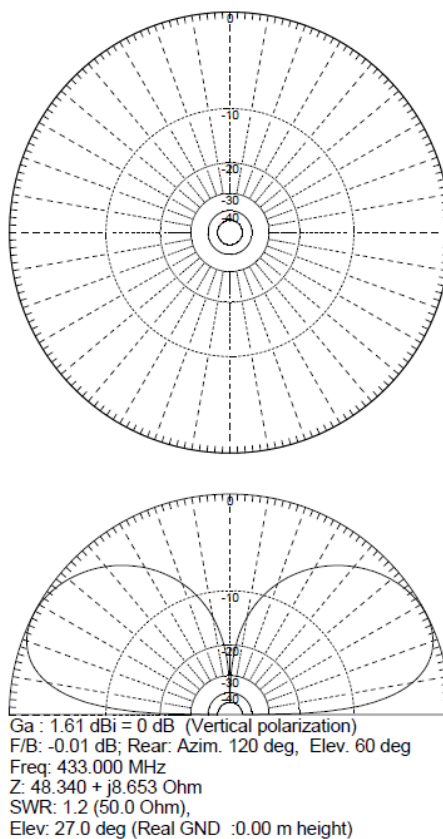
Como o projeto sugerido para antena operando em modo normal se mostrou ineficaz, outra antena foi otimizada, com intuito de viabilizar o projeto.

O objetivo de otimizar uma antena é escolher um conjunto de critérios que devem ser atendidos, uma classificação de importância para cada um dos critérios e um conjunto de limites para as dimensões possíveis da antena. Partindo de uma configuração inicial, o *software* irá calcular o ganho, a relação frente-costas e a

impedância. Usando os valores obtidos como referência, o *software* altera automaticamente uma das dimensões da antena (com um dado passo de variação) e refaz toda a análise. Se o novo projeto atender aos objetivos de maneira melhor do que o anterior, o novo projeto é mantido e outra dimensão é alterada e verificada. Como resultado, pode haver uma melhoria ou uma degradação nos parâmetros da antena. Se houver degradação, a dimensão é revertida e é variada na direção oposta. Este processo de busca exaustiva é tentado muitas vezes e, eventualmente, um ponto é alcançado, onde não há maneira possível de fazer uma melhoria em função dos limites estabelecidos. Nesse ponto, o algoritmo para.

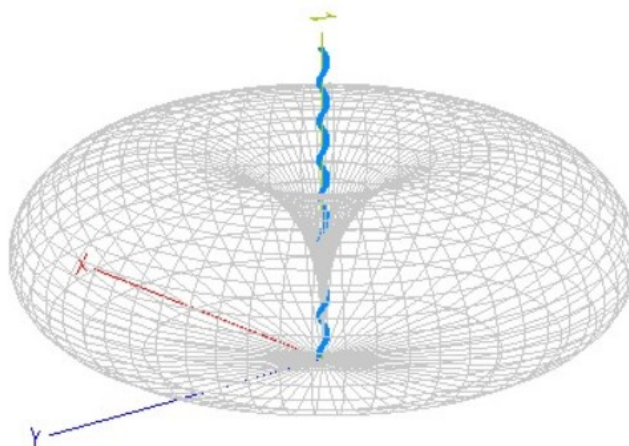
Fazendo o processo de otimização mantendo fixo o diâmetro da hélice e variando apenas o tamanho da antena e a quantidade de espiras, chegou-se que $L = 16,5$ cm, $D = 4$ mm e $S = 3,3$ cm são parâmetros satisfatórias para a implementação do projeto. As figuras 21 e 22 apresentam os diagramas de radiação (2D e 3D) da nova antena.

Figura 21 – Diagrama de radiação da antena otimizada operando em Rn.



Fonte: Simulação realizada pelo autor.

Figura 22 – Diagrama 3D da antena otimizada operando Rn.

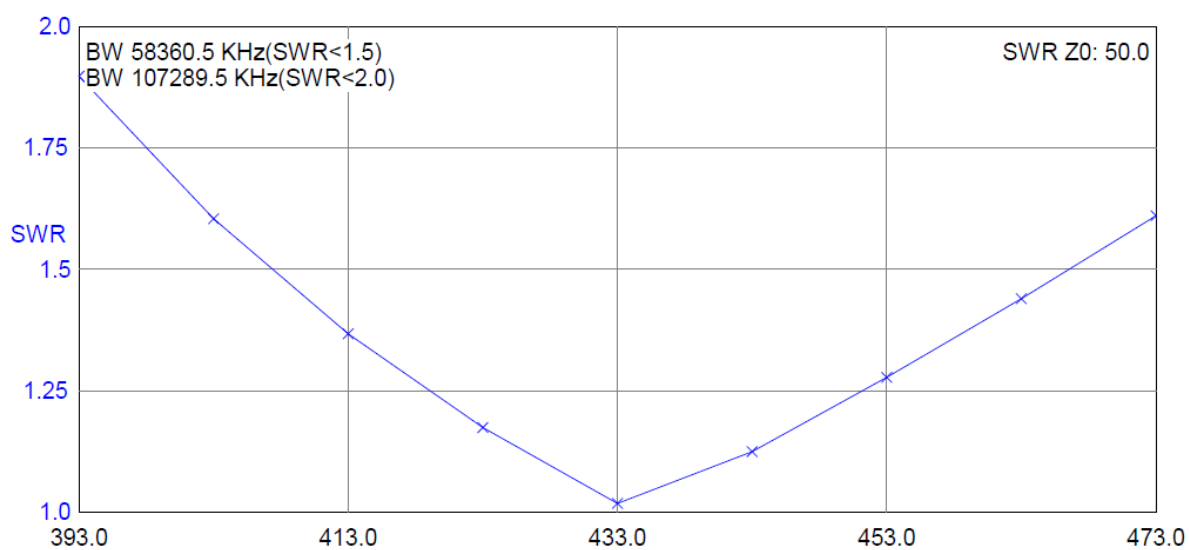


Fonte: Simulação realizada pelo autor.

De acordo com os diagramas obtidos na simulação, é possível constatar que a antena está operando em modo normal, ou seja, radiando perpendicularmente ao eixo da antena.

A figura 23 apresenta o gráfico de relação de onda estacionária (SWR) da antena otimizada para operar em modo normal.

Figura 23 - Relação de Ondas Estacionárias x frequência (antena otimizada).

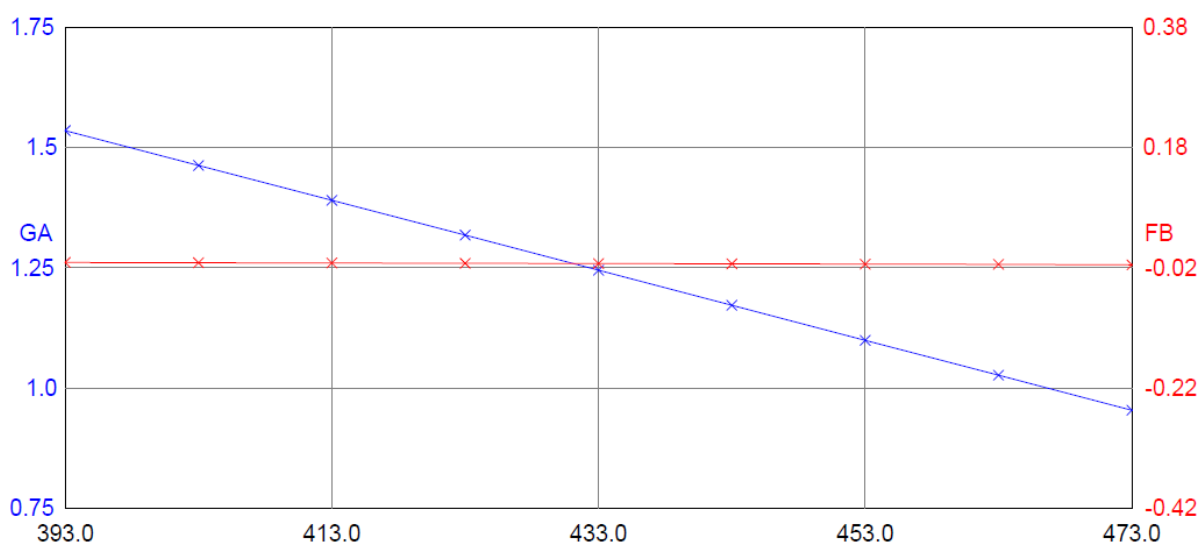


Fonte: Simulação realizada pelo autor.

Dado que o SWR chegou muito próximo ao valor ideal ($SWR = 1$), pode-se concluir que o casamento de impedâncias da antena com o cabo coaxial é muito bom na faixa em que se pretende operar a antena.

A figura 24 ilustra o ganho da antena otimizada operando em modo normal (em dBi) e a relação frente/costas (F/B, em dB).

Figura 24 - Figura 20 - Ganho (em dBi) e F/B (em dB) x Frequência (antena otimizada).



Fonte: Simulação realizada pelo autor.

O gráfico da figura 24 mostra um valor de ganho igual a 1,25 dBi da antena otimizada, o que é razoável para uma antena omnidirecional. De fato, ganhos elevados são obtidos apenas com antenas direcionais.

10 CONCLUSÃO

No LABMAQ, foi constatado que não seria possível se obter as reais informações do rotor de um motor trifásico com um simples amperímetro alicate. Por isso, faz-se necessária a implementação de um projeto que torne capaz a obtenção de tais grandezas. O objetivo deste trabalho foi apresentar as bases de um projeto que usa comunicação sem fio entre sensores instalados nos motores e na bancada do laboratório.

Tal projeto foi seccionado em três partes: amplificação e filtro, antena para transmissão e tratamento dos dados por um processador instalado no LABMAQ. A parte que coube aprofundar neste trabalho foi a possível solução de transmissão através de antenas helicoidais, buscando o melhor o modo de operação para esta aplicação.

Por meio das análises feitas neste trabalho, conclui-se que a antena trabalhando em modo axial é inviável como solução para o projeto de transmissão, devido às suas dimensões serem inaplicáveis no espaço destinado para a antena, haja vista que a antena calculada possui um tamanho total de 2 metros. Além disso, o custo para aquisição de material e construção também é elevado para um projeto que visa comunicação de curta distância. De fato, seria um desperdício de material, já que a antena foi uma alternativa a cabos de transmissão e uma antena de 2 m tem comprimento que corresponde praticamente à metade da distância de onde o processador estará alocado. Por outro lado, a antena de modo normal otimizada mostrou-se muito eficaz. Suas dimensões reduzidas, com comprimento de 16,5 cm, tornam o projeto aplicável, pois, ela seria facilmente alocada na lateral do reostato, sem ocupar um grande espaço, além de ter um custo baixo e ser de fácil construção.

O *software* utilizado nas simulações, por ser uma versão gratuita, apresenta grandes limitações, principalmente na quantidade de informações que a simulação apresenta. A impossibilidade de simular a antena junto a um plano terra ou efetuar a construção de modelos não uniformes de maneira fácil faz com que a análise seja incompleta. Outros *softwares* como, por exemplo, o Ansys HFSS, possibilitariam uma análise mais completa e mais rica em informações. Entretanto, tais *softwares* geralmente têm custo bastante elevado.

Outros trabalhos sugeridos são o projeto do amplificador e do filtro para o sinal obtido e seu tratamento, o que tornarão o projeto completo e pronto para seu uso didático.

Uma sugestão para trabalhos futuros seria utilizar o HFSS para estas simulações, podendo-se testar o uso de antenas impressas para a aplicação de comunicação em RF 433 MHz. As antenas impressas, com o desenvolvimento da tecnologia, estão cada vez menores e já estão presentes na maioria das placas com microprocessadores, tornando a aplicação para este projeto ainda mais simples.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Nobel Priza. Guglielmo Marconi: biographical. Amsterdam, 1967. Disponível em: www.nobelprize.org/prizes/physics/1909/marconi/biographical/. Acesso em: 22 nov. 2020.

GODINHO, Hélio Ferreira; LINOS, Cleisson Geraldo dos Santos; OLIVA FILHO, Oliver de Oliveira; XAVIER, Cenildo de Souza. UMA ABORDAGEM SOBRE A TECNOLOGIA 4G LTE E SUA APLICAÇÃO NO BRASIL. Fortaleza: Revista Científica Semana Acadêmica, 2018. Disponível em: <https://semanaacademica.com.br/artigo/uma-abordagem-sobre-tecnologia-4g-lte-e-sua-aplicacao-no-brasil>. Acesso em: 20 nov. 2020.

IEEE. Standard for Definitions of Terms for Antennas. Estados Unidos: Ieee, 2014. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6758443/citations#citations>. Acesso em: 20 nov. 2020.

JHON. The Helical Antenna. Nova York: Ieee, 1949.

“ORFANIDIS, Sophocles J. Electromagnetic Waves and Antennas. Piscataway: Rutgers University, 2016. Disponível em: <https://www.ece.rutgers.edu/~orfanidi/ewa/>. Acesso em: 19 nov. 2020.

UMANS, Stephen D (comp.). Máquinas Elétricas: de fitzgerald e kingsley. 7. ed. Porto Alegre: Bookman, 2014.

HENRIQUE, Hélio. Motores Trifásicos de CA. Mossoró: Ifrn, 2014. Color. Disponível em: <https://docente.ifrn.edu.br/heliopinheiro/Disciplinas/maquinas-acionamentos-eletricos/aula-de-motores-trifasicos-de-ca>. Acesso em: 11 nov. 2020.

MOTORES elétricos assíncronos e síncronos de média tensão – especificação, características e manutenção. Jaraguá do Sul: Weg, 2015. Disponível em: [https://docente.ifsc.edu.br/rafael.grebogi/MaterialDidatico/Eletromecanica/Eletricidade%20Industrial%20\(OLD\)/WEG-curso-dt-6-motores-eletricos-assincrono-de-alta-tensao-artigo-tecnico-portugues-br.pdf](https://docente.ifsc.edu.br/rafael.grebogi/MaterialDidatico/Eletromecanica/Eletricidade%20Industrial%20(OLD)/WEG-curso-dt-6-motores-eletricos-assincrono-de-alta-tensao-artigo-tecnico-portugues-br.pdf). Acesso em: 11 nov. 2020.

CHAPMAN, S. J. Fundamentos de Máquinas Elétricas. 5. ed. New York: The McGraw-Hill Companies, 2012.

TORO, Vincent del. Fundamentos de Máquinas Elétricas. New Jersey: Prentice-Hall, 1990.

IEEE Antennas and Propagation Magazine (Volume: 45, Issue: 2, April 2003).

JHON. Helical beam antennas. Nova York: Ieee, 1947.

BALANIS, Constantine. Antenna Theory Analysis and Design. 3. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2005.

EMERSON, W.. Electromagnetic wave absorbers and anechoic chambers through the years. *Ieee Transactions On Antennas And Propagation*, [S.L.], v. 21, n. 4, p. 484-490, jul. 1973. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/tap.1973.1140517>.

GILLETTE, M.. RF anechoic chamber design using ray tracing. 1977 *Antennas And Propagation Society International Symposium*, [S.L.], p. 246-252, June 1977. Institute of Electrical and Electronics Engineers. <http://dx.doi.org/10.1109/aps.1977.1147813>.

ESTADOS UNIDOS. NASA. . **In the Beginning**. 2008. Disponível em: https://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/image_feature_757.html. Acesso em: 11 nov. 2020.

KUMMER, W.H.; GILLESPIE, E.s.. Antenna measurements—1978. **Proceedings Of The Ieee**, [S.L.], v. 66, n. 4, p. 483-507, 1978. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/proc.1978.10940>.

KRAUS, J. D.. **Antennas**. New York: Mc Graw-Hill, 1997.

STUTZMAN, Warren L.. **Antenna Theory and Design**. 3. ed. Estados Unidos: Jhon Wiley & Sons, 2012. (ISBN: 978-0-470-57664-9).

TICE, T. E.; KRAUS, J. D.. The influence of conductor size on the properties of helical beam antennas. **Proc. Ire**, [s. l.], v. 27, p. 1296-1296, Não é um mês valido! 1949.

DJORDJEVIC, Antonije R.; ZAJIC, Alenka G.; ILIC, Milan M.; STUBER, Gordon L.. Optimization of Helical antennas [Antenna Designer's Notebook]. **Ieee Antennas And Propagation Magazine**, [S.L.], v. 48, n. 6, p. 107-115, dez. 2006. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/map.2006.323359>.

EUROPEAN COMMUNICATIONS OFFICE. **ERC RECOMMENDATION 70-03: RELATING TO THE USE OF SHORT RANGE DEVICES (SRD)** Including Appendixes and Annexes. Europa: European Communications Office, 2004. Disponível em: <https://home.zhaw.ch/~kunr/NTM1/praktikum/New-CEPT-70-03-Document.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2020.

LIU, Wendong; ZHANG, Zhijun; ZHENG, Jianfeng; FENG, Zhenghe. A novel miniaturized antenna for ISM 433MHz wireless system. **2011 Ieee Electrical Design Of Advanced Packaging And Systems Symposium (Edaps)**, [S.L.], p. 1-4, dez. 2011. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/edaps.2011.6213726>.

AGENCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES. **RESOLUÇÃO 365: REGULAMENTO SOBRE EQUIPAMENTOS DE RADIOCOMUNICAÇÃO DE RADIAÇÃO RESTRITA**. Brasil: Anatel, 2004. Disponível em: https://www.anatel.gov.br/Portal/verificaDocumentos/documento.asp?null&filtro=1&documentoPath=biblioteca/resolucao/2004/Anexo_res_365_2004.pdf. Acesso em: 10 nov. 2020.

AGENCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES. **RESOLUÇÃO 680:** REGULAMENTO SOBRE EQUIPAMENTOS DE RADIOCOMUNICAÇÃO DE RADIAÇÃO RESTRITA. Brasil: Anatel, 2017. Disponível em: <https://www.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/2017/936-resolucao-680>. Acesso em: 19 out. 2020.

LUDWIG, Ricardo. **HOUSEMANAGER – COMUNICAÇÃO SEM FIO DE BAIXO CUSTO PARA SISTEMA DE AUTOMAÇÃO RESIDENCIAL**. 2015. 81 f. TCC (Graduação) - Curso de Informática, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2015. Disponível em: http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/5854/1/PB_ESPRC_II_2015_14.pdf. Acesso em: 11 nov. 2020.