



INSTITUTO FEDERAL DA PARAÍBA – IFPB
DEPARTAMENTO DE ENSINO SUPERIOR
COORDENAÇÃO DO CURSO DE BACHARELADO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA

JÚLIA LEITE BEZERRA DE MELO

**ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DE DIAGRAMAS DE
IRRADIAÇÃO DE ANTENA PLANAR**

JOÃO PESSOA – PB

2022

JÚLIA LEITE BEZERRA DE MELO

**ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DE DIAGRAMAS DE
IRRADIAÇÃO DE ANTENA PLANAR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso Superior de Bacharelado em Engenharia Elétrica, no Instituto Federal da Paraíba – IFPB, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

JOÃO PESSOA – PB

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca Nilo Peçanha do IFPB, *campus* João Pessoa

M528a Melo, Júlia Leite Bezerra de.

Análise numérica e experimental de diagramas de irradiação
de antena planar / Júlia Leite Bezerra de Melo. – 2022.

39 f. : il.

TCC (Graduação - Curso Superior de Bacharelado em
Engenharia Elétrica) - Instituto Federal de Educação da Paraíba /
Unidade Acadêmica de Processos Industriais, 2022.

Orientação : Prof^o D.r Jefferson Costa e Silva.

1.Diagrama de irradiação. 2. Antena planar. 3. HFSS. 4. Pla-
nos de medição. 5. Cortes. I. Título.

CDU 621.396.67(043)

Lucrecia Camilo de Lima
Bibliotecária - CRB 15/132

ATA 30/2023 - CCSBEE/UA3/UA/DDE/DG/JP/REITORIA/IFPB

Coordenação do Curso Superior de Bacharelado

em Engenharia Elétrica
CCSBEE-JP

**ATA DE APRESENTAÇÃO PÚBLICA E AVALIAÇÃO DE
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

ATA Nº:	285/2023
(Nº / ANO)	

Às nove horas e trinta minutos do dia nove do mês de fevereiro do ano de dois mil e vinte e três, no Laboratório de Fibras Ópticas do IFPB, foi realizada a Apresentação Pública e Avaliação do Trabalho de Conclusão de Curso intitulado "**ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DE DIAGRAMAS DE IRRADIAÇÃO DE ANTENA PLANAR**", do(a) aluno(a) **JULIA LEITE BEZERRA DE MELO**, requisito obrigatório para conclusão do CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, com os membros da Banca Examinadora **JEFFERSON COSTA E SILVA, DR.** (Orientador, IFPB), **ALFREDO GOMES NETO, DR.** (Examinador, IFPB) e **JOABSON NOGUEIRA DE CARVALHO, DR.** (Examinador, IFPB). Após a apresentação e as considerações da Banca Examinadora, o trabalho foi considerado **APROVADO**, com nota **80** sendo esta composta pela média aritmética das seguintes avaliações parciais:

Texto:	Apresentação:	Defesa oral:
70	80	90

Eu, **JEFFERSON COSTA E SILVA, DR.** (Orientador, IFPB), lavrei a presente Ata, que segue assinada por mim e pelos demais membros da Banca Examinadora.

Observações:

Documento assinado eletronicamente por:

- Gilvan Vieira de Andrade Junior, COORDENADOR DE CURSO - FUCI - CCTELT-JP, em 14/02/2023 18:16:53.
- Jefferson Costa e Silva, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLÓGICO, em 14/02/2023 18:22:41.
- Joabson Nogueira de Carvalho, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLÓGICO, em 14/02/2023 18:29:43.
- Alfredo Gomes Neto, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLÓGICO, em 14/02/2023 19:38:44.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 14/02/2023. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código: 389547
Verificador: fc675a41a9
Código de Autenticação:



Aos meus pais, que sempre fizeram além do possível para eu conseguir ter aquilo que eles não foram capazes de obter: educação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, que tanto se esforçaram para sempre me proporcionar o melhor e me permitir me dedicar por completo aos meus estudos.

Agradeço a minha irmã, que sempre me apoiou nos momentos mais decisivos e estressantes durante a graduação.

Agradeço a meus amigos que sempre estiveram comigo nos melhores e piores momentos. Sou grata a todos os professores que participaram da minha jornada pelo IFPB. Em especial meu orientador Jefferson Costa, devido paciência e parceria durante o período de realização desse projeto.

Um agradecimento especial a Matheus Lucas, por compartilhar seus conhecimentos no software ANSYS HFSS, sendo de grande ajuda na finalização desse trabalho.

Por fim, agradeço aos meus colegas de curso, que juntos levamos esses anos de graduação com mais leveza e prazer.

*But remember this, japanese boy... Airplanes
are not tools for war. They are not for
making money. Airplanes are beautiful
dreams. Engineers turn dreams into reality.*

Hayao Miyazaki

RESUMO

O presente trabalho realiza uma análise dos diagramas de irradiação das antenas planares, discorrendo sobre a obtenção desses gráficos de forma bidimensional, mesmo originalmente eles sendo tridimensionais. Isso é possível devido a cortes feitos nos diagramas em 3D. O projeto em questão explica como funcionam esses cortes nos planos de medição. Ademais, é feito um comparativo dos resultados medidos em laboratório, utilizando uma antena planar física, com os obtidos na simulação utilizando o *software* Ansys HFSS.

Palavras-chave: Diagrama de irradiação, Antena planar, HFSS, Cortes, Plano de medição

ABSTRACT

The present work performs an analysis of the radiation diagrams of planar antennas, and how it is to obtain these graphics in a two-dimensional way, even though originally they are three-dimensional. This occurs due to cuts made in the 3D diagram. The project in question explains how these cuts work through the plans of measurement. In addition, a comparison of the results measured in the laboratory is made, using a physical planar antenna, with those obtained in the simulation using the software Ansys HFSS.

Keywords: Radiation diagrams, Planar antennas, HFSS, Cuts, Plans of measurement

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Amostra de resultados coletados em laboratório	23
Tabela 2 – Amostra de resultados para $\theta = 90^\circ$ em polarização AVV	27
Tabela 3 – Amostra de resultados para $\phi = 0^\circ$ em polarização AHV	28
Tabela 4 – Amostra de resultados obtidos no HFSS para os valores de θ com ϕ fixado em 90°	31
Tabela 5 – Amostra de resultados obtidos no HFSS para os valores de ϕ com θ fixado em 90°	32
Tabela 6 – Amostra dos resultados de S21 da polarização AVV apos a normalização	34
Tabela 7 – Amostra dos resultados de S21 da polarização AHV apos a normalização	36

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de diagrama de irradiação tridimensional e seus respectivos cortes.	11
Figura 2 – Exemplo de diagrama de irradiação bidimensional e seus respectivos cortes.	12
Figura 3 – Estrutura básica de uma antena de microfita.	15
Figura 4 – Diagrama retangular, polar e tridimensional de uma antena.	15
Figura 5 – Plano de elevação e azimutal em uma antena diretiva.	16
Figura 6 – Planos V e H	17
Figura 7 – Exemplar de um diagrama de irradiação	18
Figura 8 – Planos x-y e x-z	18
Figura 9 – Antena utilizada no projeto	20
Figura 10 – Sistema montado para medição - AVV	21
Figura 11 – Sistema montado para medição - AHV	22
Figura 12 – Propriedades da antena	23
Figura 13 – Antena utilizada no projeto	24
Figura 14 – Coeficiente de reflexão da antena obtido em laboratorio	26
Figura 15 – Diagrama polar AVV	27
Figura 16 – Diagrama polar AHV	28
Figura 17 – Diagrama polar AHV apos resultados rebatidos	29
Figura 18 – Coeficiente de reflexão da antena simulado no HFSS	30
Figura 19 – Gráfico para a variação de θ com ϕ fixado em 90°	31
Figura 20 – Gráfico para a variação de ϕ com θ fixado em 90°	32
Figura 21 – Diagrama tridimensional da antena simulada	33
Figura 22 – Cortes nos planos de medição	33
Figura 23 – Gráfico comparativo da polarização AVV	35
Figura 24 – Gráfico comparativo da polarização AHV	36

SUMÁRIO

1	Introdução	11
2	Objetivos	13
3	Fundamentação Teórica	14
3.1	ANTENAS	14
3.2	DIAGRAMA DE IRRADIAÇÃO	15
3.3	DIAGRAMAS DE RADIAÇÃO VERTICAL E HORIZONTAL	16
4	Materiais e Métodos	20
4.1	CARACTERIZANDO A ANTENA EM LABORATÓRIO	20
4.2	SIMULANDO A ANTENA NO HFSS	23
5	Resultados	26
5.1	MEDIÇÕES EM LABORATORIO	26
5.2	SIMULAÇÕES NO HFSS	30
5.3	COMPARANDO RESULTADOS	34
6	Considerações Finais	37
	REFERÊNCIAS	38

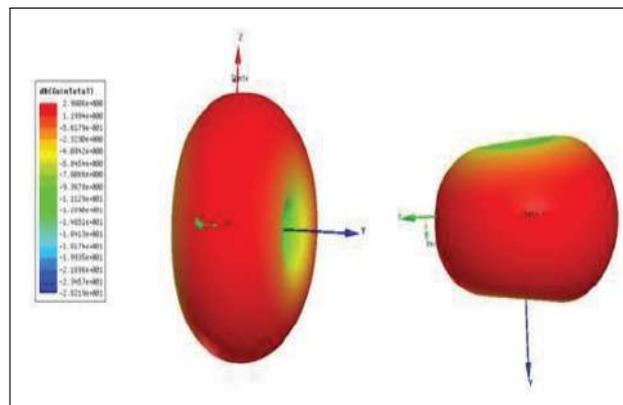
1 INTRODUÇÃO

De acordo com (BALANIS, 2005), uma antena pode ser definida como um dispositivo para radiação ou recepção de ondas de rádio, que pode ser alimentada por cabo coaxial ou por uma guia de onda. Como exemplo de tipos de antenas, tem-se as antenas planares (ou de microfitas), que consistem em duas placas condutoras (*patch* e plano de terra) separadas por material dielétrico (substrato), e podem ser facilmente construídas utilizando da tecnologia dos circuitos impressos.

Com o objetivo de possuir uma maior compreensão das características de uma antena é importante ressaltar a existência dos diagramas de irradiação, que fornecem uma visualização de como esses dispositivos irradiam no espaço. Cada antena tem uma forma única de irradiar, então a depender da situação é necessário estudar o diagrama das antenas com o objetivo de utilizar a mais adequada para cada aplicação.

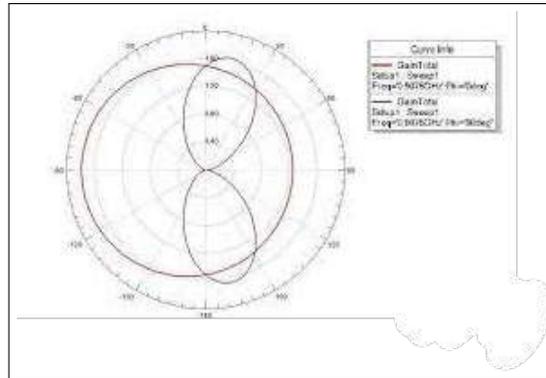
O diagrama de irradiação consiste em uma figura tridimensional (3D), mas é possível representá-lo em apenas duas dimensões (2D) por meio de cortes horizontais e verticais no diagrama 3D, tornando a sua visualização mais intuitiva, conforme Figuras 1 e 2.

Figura 1 – Exemplo de diagrama de irradiação tridimensional e seus respectivos cortes.



FONTE: (ROCHA *et al.*, 2012)

Figura 2 – Exemplo de diagrama de irradiação bidimensional e seus respectivos cortes.



FONTE: (ROCHA *et al.*, 2012)

É muito complexo realizar o levantamento do diagrama de irradiação tridimensional de uma antena, é por isso que foram escolhidos os dois planos mais importantes, vertical e horizontal, para compreender como a antena irradia no espaço. No entanto, ainda se tem alguns questionamentos em relação a esses cortes no diagrama, causando muita confusão em situações de medições ou simulações de antena.

Assim, este trabalho tem como objetivo realizar simulações dos diagramas de irradiação 2D de uma antena planar com *patch* retangular e comparar esses resultados com os obtidos através de medições em laboratório para a mesma antena, de modo a se esclarecer os cortes realizados no diagrama de irradiação 3D da antena utilizada. As simulações foram realizadas através do *software* ANSYS HFSS, que consiste em um programa de simulação em 3D utilizado para simular produtos eletrônicos de alta frequência, como antenas, arranjo de antenas e placas de circuito impresso.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral desse trabalho é compreender como são obtidos os diagramas de irradiação 2D de uma antena planar. Entender que se trata de uma figura tridimensional, mas que pode ser representada bidimensionalmente através de cortes horizontais e verticais no diagrama em 3D. Neste trabalho são feitas as visualizações desses cortes tanto na prática, ou seja, realizando medições em laboratório, quanto em simulações, demonstrando que em ambos os métodos os resultados são proporcionais.

Para tal finalidade, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Entender a diferença entre os planos bidimensionais de um diagrama de irradiação a partir de um diagrama 3D;
- Determinar diagramas de irradiação da antena através dos resultados obtidos em laboratório;
- Determinar o diagrama em 3D de uma antena planar com *patch* retangular e entender como são feitos os cortes a fim de obter os diagramas bidimensionais;
- Observar o comparativo dos resultados obtidos nas medições práticas e simuladas.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo é apresentada uma visão geral acerca dos termos concernentes a este trabalho, tais como a definição de antena, uma demonstração da antena planar utilizada para a realização do trabalho, o próprio diagrama de irradiação e finalmente o processo de obtenção do diagrama 2D através de cortes horizontais ou verticais no diagrama 3D.

3.1 ANTENAS

De acordo com (BALANIS, 2005) as antenas são estruturas geralmente metálicas alimentadas por cabo coaxial ou por um guia de onda. É através desse dispositivo de guiamento, ou linha de transmissão, que a energia eletromagnética é transportada da fonte de transmissão à antena ou da antena ao receptor. Existem diversos tipos de antenas que se diferenciam por formato, dimensão, estrutura e configuração, então é preciso selecionar o tipo correto da antena para que os resultados desejados sejam obtidos.

Esses dispositivos são projetados para operar em uma determinada frequência ou faixa de frequência, de modo que fora desse intervalo o sinal seja bastante atenuado ou completamente rejeitado.

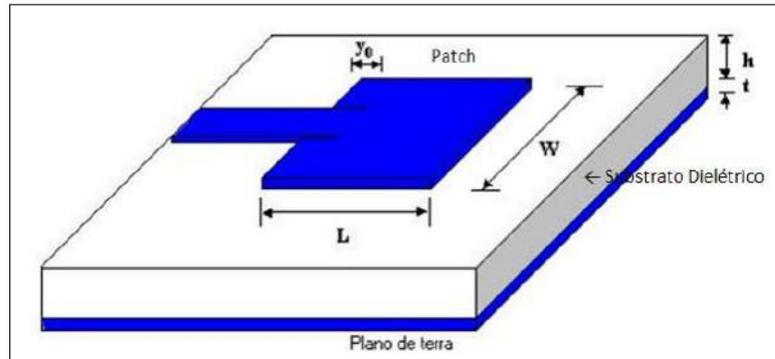
Uma outra característica das antenas é a perda por retorno (*Return Loss*), que consiste na quantidade do sinal que é refletida, ou seja, o quanto do sinal que está sendo entregue a antena, está voltando. A perda por retorno é causada pelo descasamento de impedância entre a linha de alimentação e a antena. Esse valor é indicado pelo parâmetro S, sendo mais comumente utilizado S11 (coeficiente de reflexão). Assim, ao determinar o S11 da antena, é possível visualizar a frequência que ela melhor irradia o sinal, conhecida como frequência de ressonância.

Para o trabalho em questão, foi utilizada a antena de microfita, que de acordo com (SILVEIRA; SILVA, 2016), possui pequena dimensão e é utilizada em aplicações de alta frequência, atuando na faixa de frequência de micro-ondas de 300MHz a 30GHz, e surgiu devido a evolução dos sistemas de micro-ondas e de seus circuitos integrados juntamente com a necessidade do mercado em desenvolver e utilizar antenas de baixo custo de fabricação.

A configuração mais simples desse tipo de antena consiste em duas placas condutoras e paralelas entre si, conectadas por uma camada dielétrica chamada de substrato.

Uma das placas é o elemento irradiador, também conhecido por *patch*, enquanto a outra será o plano de terra, conforme evidenciado na Figura 3.

Figura 3 – Estrutura básica de uma antena de microfita.

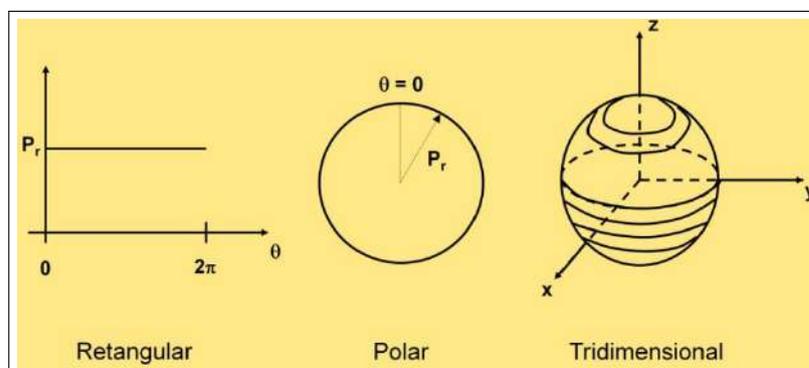


FONTE: (SILVEIRA; SILVA, 2016)

3.2 DIAGRAMA DE IRRADIAÇÃO

É a partir do diagrama de irradiação da antena que é retirado informações importantes sobre seu funcionamento. É uma forma de visualizar e medir a densidade de potência irradiada pela antena nas diversas direções. Para o levantamento deste diagrama, supõe-se a antena localizada na origem de um sistema de coordenadas esféricas. Os valores medidos são transportados para um gráfico em coordenadas retangulares ou polares. Diante dessa informação, vale ressaltar que têm-se três tipos de diagrama de irradiação, o retangular, o polar e o tridimensional. As diferenças visuais nas representações desses gráficos encontram-se na Figura 4.

Figura 4 – Diagrama retangular, polar e tridimensional de uma antena.

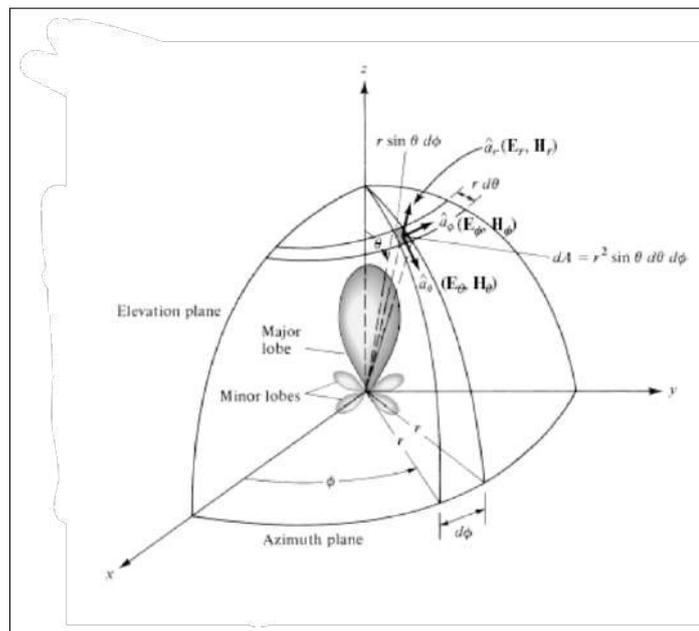


FONTE: (INATEL)

Segundo (ARAÚJO, 2017), os diagramas bidimensionais de uma antena são

postos em dois planos: plano vertical e plano horizontal. O plano vertical se localiza no plano x-z ou y-z e refere-se àquele que contém o vetor campo elétrico na direção de máxima irradiação, conhecido como plano de elevação ($\phi = 0^\circ$ ou $\phi = 90^\circ$). Em contrapartida, o plano horizontal se localiza no plano x-y e refere-se àquele que contém o vetor campo magnético na direção de máxima irradiação, conhecido como plano azimutal ($\theta = 90^\circ$). Para uma melhor visualização dessas definições, têm-se a Figura 5.

Figura 5 – Plano de elevação e azimutal em uma antena diretiva.



FONTE: (INATEL)

Esse diagrama pode ser obtido tanto pelo deslocamento de uma antena de prova em torno da antena que está sendo medida, como pela rotação da referida antena em torno do seu eixo, sendo então captada e mensurada sua potência. Os resultados obtidos são geralmente normalizados pela potência máxima captada na direção de maior diretividade.

3.3 DIAGRAMAS DE RADIAÇÃO VERTICAL E HORIZONTAL

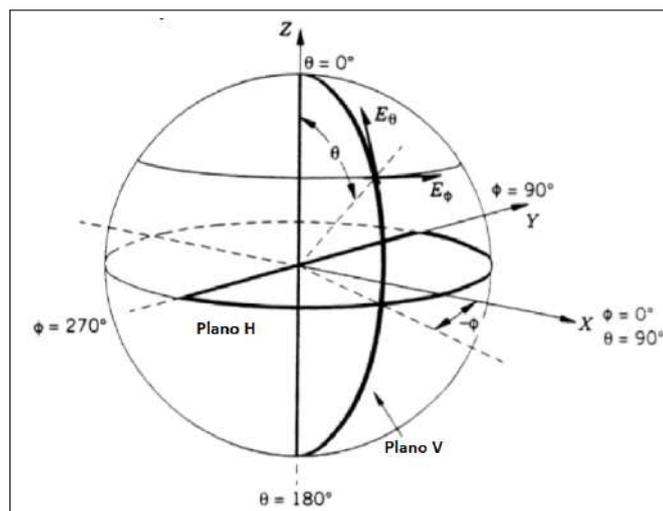
Conforme mencionado anteriormente, é possível representar o diagrama de irradiação em três dimensões, mas por não ser um gráfico muito prático para se verificar os parâmetros desejados é possível fazer uma análise do funcionamento das antenas por meio de gráficos bidimensionais mediante cortes em dois planos principais: vertical e horizontal.

De acordo com (MOTA, 2018), o diagrama de radiação vertical só pode ser

obtido quando ambas as antenas transmissora e receptora encontram-se em polarização vertical, o mesmo acontece para obter o diagrama horizontal da antenna, ambas as antenas transmissora e receptora devem estar em polarização horizontal. Desse modo, a antenna gira em relação a seu próprio eixo no momento da realização das medidas de potência.

O plano vertical (plano V) é obtido através do corte onde o ângulo ϕ é equivalente a 90° ou a 0° , a depender do plano x-z ou y-z que está sendo realizado o corte. Por outro lado, o plano horizontal (plano H) é obtido através do corte em que o angulo θ é equivalente a 90° . No momento da realização das medidas, o diagrama em plano V é obtido quando as medidas são feitas com as antenas na posição que faça com que o campo elétrico transmitido seja de polarização vertical, por outro lado, o diagrama em plano H é obtido quando o campo é transmitido em polarização horizontal. A Figura 6 ilustra a posição dos planos V e H.

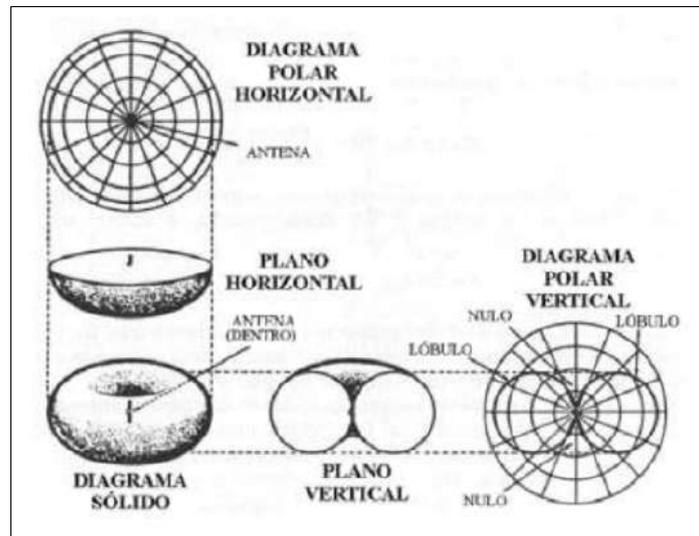
Figura 6 – Planos V e H



FONTE: (SILVA, 2014)

Assim, é possível concluir que para obter o diagrama de polarização vertical da antenna, o angulo ϕ é fixado em 0° ou 90° e, com a rotação da antenna em relação ao seu eixo, é obtido o valor das potências para cada variação de ângulo θ . Em contrapartida, o diagrama de polarização horizontal é adquirido quando o plano de corte tem como valor do angulo θ fixado em 90° , variando a angulação de ϕ . Obtendo-se o gráfico correspondente é possível traçá-lo na forma retangular ou polar, sendo fornecido dados e características importantes da antenna.

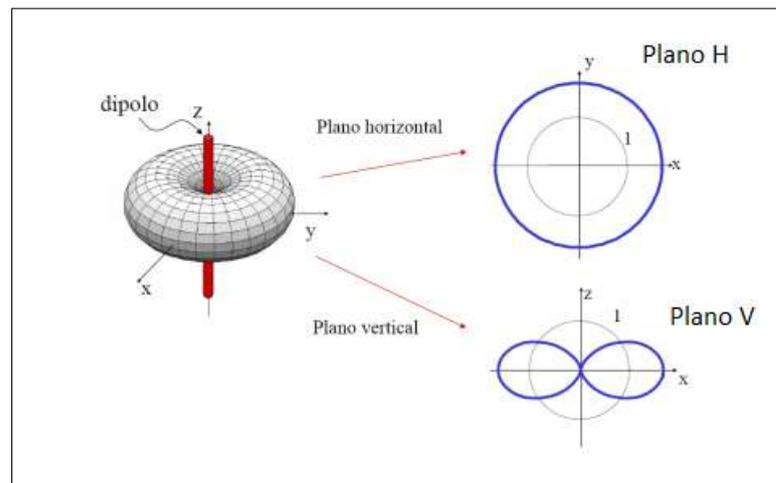
Figura 7 – Exemplo de um diagrama de irradiação



FONTE: (SILVA, 2014)

A fim de exemplificar os cortes, observa-se na figura 7 que a representação gráfica do diagrama sólido refere-se ao diagrama 3D completo da antena em questão. Após realizar os cortes horizontais e verticais no diagrama sólido, obtemos as representações gráficas equivalentes na forma polar. Para um melhor entendimento do funcionamento desses cortes em relação aos planos x-y-z, verificar a Figura 8.

Figura 8 – Planos x-y e x-z



FONTE: (HUIDOBRO, 2013)

Ao realizar o corte no plano horizontal do diagrama, vemos que a antena é omnidirecional, ou seja, no plano x-y a antena emite o mesmo sinal em todas as direções, como é verificado na Figura 8.

Quando o diagrama sólido da Figura 7 é seccionado verticalmente, têm-se uma representação gráfica bem diferente da obtida após o corte horizontal, visto que esses cortes estudam o comportamento da antena em planos diferentes. O diagrama polar vertical, diferentemente do horizontal, não mostra mais uma antena omnidirecional. Isto é, no plano $x-z$ a antena já não emite o mesmo sinal em todas as direções, como o que acontece no plano $x-y$. Assim, fica exemplificado que a antena emite sinal em todas as direções em ambos os planos, mas é possível compreender o funcionamento da antena realizando os cortes nos planos de medição, resultando nos diagramas bidimensionais.

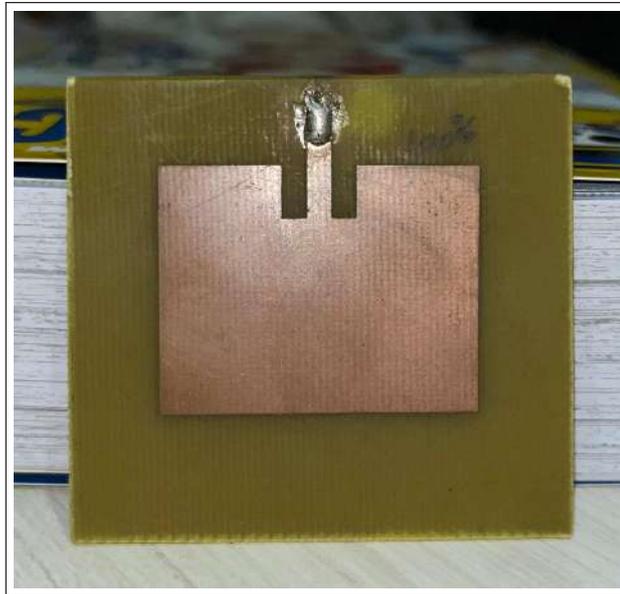
4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, as técnicas utilizadas para as análises numéricas e experimentais dos diagramas de irradiação de uma antena planar serão abordados. Haverá menção aos métodos usados em laboratório e no HFSS, software utilizado para simular a antena.

4.1 CARACTERIZANDO A ANTENA EM LABORATÓRIO

Para a antena receptora optou-se por uma antena planar com 5,8cm de largura, 5,4cm de comprimento e a espessura do dielétrico sendo de 0,16cm, conforme Figura 9. A antena utilizada possui um *patch* retangular com 37,87mm de largura e 29,19mm de comprimento, com uma abertura de 3mm em cada lado da porta de alimentação. A placa utilizada na fabricação da antena utilizada é de fibra de vidro, com constante dielétrica de 4,4 e a tangente de perdas igual a 0,02. Todas essas características influenciam na onda irradiada.

Figura 9 – Antena utilizada no projeto



FONTE: Produzida pela autora

Com a antena planar definida foi montado o sistema para realizar a medição do diagrama de irradiação utilizando uma antena corneta do tipo *double ridge guide* como transmissora. Acoplou-se a antena planar em uma base giratória de acrílico, tornando possível girá-la de 5° em 5° para determinar o quanto ela irradia estando direcionada para diferentes posições. O sistema montado está na Figura 10.

Figura 10 – Sistema montado para medição - AVV



FONTE: Produzida pela autora

Primeiramente foi necessário medir o coeficiente de reflexão (S_{11}) para entender o comportamento da antena planar e ter conhecimento da frequência que ela mais irradia sinal. Futuramente esse valor conhecido como frequência de ressonância será utilizado em cada uma das posições para gerar o gráfico polar da antena.

O método de obtenção do diagrama de irradiação consistiu em posicionar a antena planar em determinadas posições, iniciando em 0° , sendo possível aferir os resultados no analisador de redes utilizado, que consiste em um equipamento no modelo E5071C da fabricante *Agilent Technologies*. Esse processo se repetiu até ter os valores nas angulações de interesse, de 0° a 360° , e após ter submetido a antena planar a posições vertical e horizontal no espaço.

Conforme verificado na Figura 10, inicialmente as duas antenas foram dispostas no sentido determinado pela autora como vertical. Esse método de medição foi se repetindo até a obtenção dos resultados variando o sentido da antena planar, denominados de AVV e AHV.

- AVV - Antena Vertical-Vertical: ambas as antenas encontram-se dispostas no mesmo sentido, denominado de vertical pela autora;
- AHV - Antena Horizontal-Vertical: a antena corneta encontra-se disposta no sentido vertical, enquanto a planar está na horizontal.

Para um melhor entendimento de como o sistema foi montado em laboratório, deve-se visualizar a Figura 10 para compreender a posição AVV e a Figura 11 para entender a AHV.

Figura 11 – Sistema montado para medição - AHV



FONTE: Produzida pela autora

Após a finalização das medições, os resultados foram salvos no formato compatível com o *Excel*, e com a ajuda desse programa foi possível obter o diagrama polar para cada angulação. O analisador de rede obteve o valor do coeficiente de transmissão, conhecido como S_{21} , em função da frequência para a faixa de 1 GHz a 6 GHz. Assim, a cada posição angular da antena foi gerado resultados semelhantes ao expressado na Tabela 1, que consiste em apenas uma amostra do obtido em laboratório.

Tabela 1 – Amostra de resultados coletados em laboratório

Frequência (GHZ)	S21 (dB)
1,00	-44,27
1,03	-43,14
1,05	-44,09
1,08	-46,05
1,10	-48,72
1,13	-50,52
1,15	-49,09
1,18	-50,79

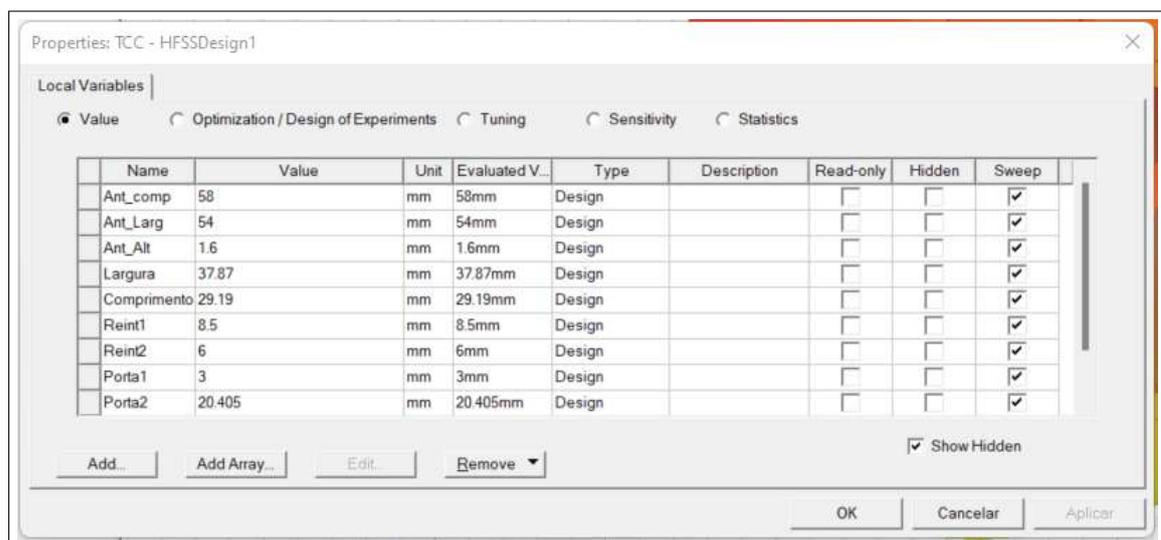
FONTE: Produzida pela autora.

Como a frequência de ressonância da antena é conhecida, devido à medição do coeficiente de reflexão (S11) inicialmente coletado, foi utilizado apenas o S21 correspondente a essa frequência, em cada uma das angulações. Todos esses valores foram agrupados em uma só tabela, resultando no diagrama polar da antena.

4.2 SIMULANDO A ANTENA NO HFSS

Com o objetivo de simular a antena planar, utilizou-se o *software* Ansys HFSS (*High Frequency Simulation Software*). Assim, foram adicionadas ao programa as propriedades de medida da antena, como mostra a Figura 12.

Figura 12 – Propriedades da antena



FONTE: Produzida pela autora via HFSS

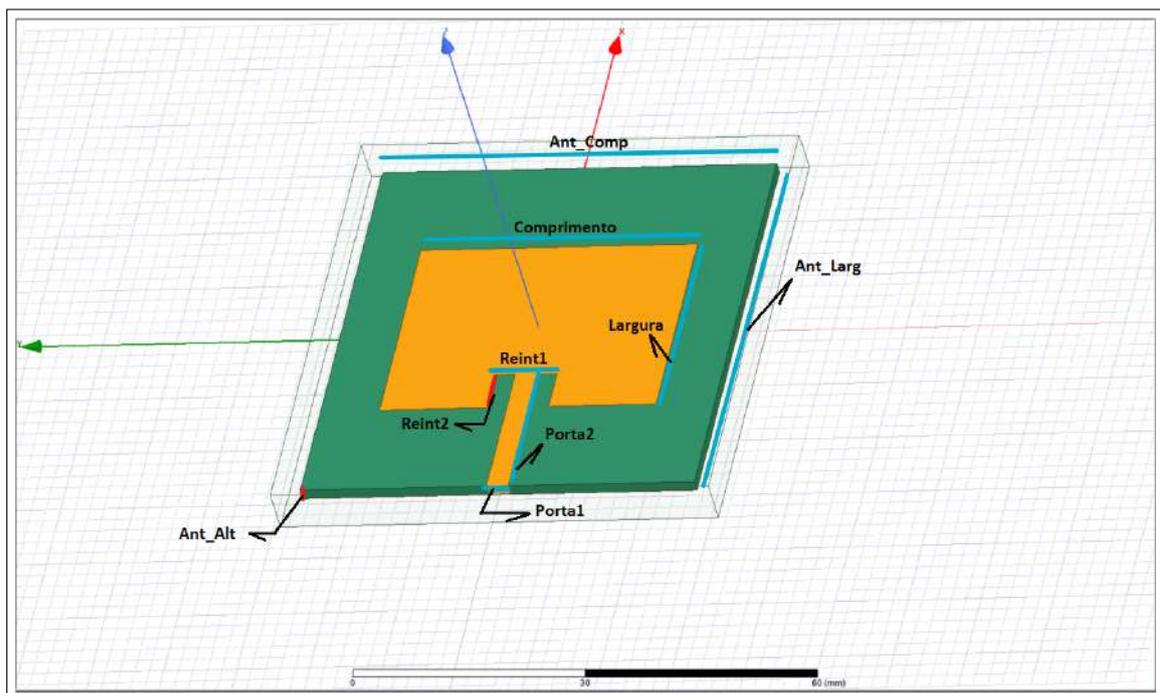
Conforme mencionado anteriormente, a antena planar utilizada consiste em

uma placa de circuito impresso com um *patch* no formato retangular. Inseriu no HFSS as medidas tanto da placa quanto do *patch*, com o intuito da simulação trazer resultados bem próximos aos obtidos em laboratório. Analisando a Figura 12, temos que as variáveis acrescentadas ao programa foram:

- Ant-Comp = Comprimento da placa;
- Ant-Larg = Largura da placa;
- Ant-Alt = Altura da placa, que foi utilizada conforme padrão nas placas utilizadas no IFPB;
- Largura = Largura do *patch*;
- Comprimento = Comprimento do *patch*;
- Reint1 = Comprimento da porta + comprimento dos espaços vazios ao lado da porta;
- Reint2 = Largura do espaço vazio ao lado da porta;
- Porta1 = Comprimento da porta;
- Porta 2 = Largura da porta.

Com as medidas inseridas, a antena planar foi simulada e encontra-se na Figura 13, com as variáveis utilizadas devidamente apontadas.

Figura 13 – Antena utilizada no projeto



FONTE: Produzida pela autora via HFSS

Assim como feito em laboratório, foi simulado o coeficiente de reflexão da antena (S11) para compará-lo com o medido em laboratório. Caso esse comparativo resultasse em uma diferença elevada, teria sido necessário realizar algumas manipulações nas propriedades dos parâmetros usados no HFSS, a fim de obter resultados de S11 similares entre a antena física e a simulada.

No HFSS é possível visualizar o diagrama tridimensional da antena, mas a fim de obter o diagrama vertical e horizontal do dispositivo, o ângulo θ e o ângulo ϕ precisam ser ajustados manualmente. Em termos de exemplificação, tem-se que para determinar o diagrama horizontal, o ângulo ϕ é variado de 5° em 5° e o ângulo θ é fixado em 90° . O mesmo acontece com a obtenção do diagrama vertical, mas dessa vez com as angulações invertidas, ou seja, o θ é variado de 5° em 5° enquanto o ϕ é fixado a uma angulação de 90° ou 0° .

O método utilizado na simulação para a obtenção desses diagramas é diferente do processo realizado com os dados obtidos em laboratório. Isso porque o HFSS já disponibiliza o diagrama polar com a frequência de ressonância da antena, visto que trata-se de uma propriedade já determinada. Dessa forma, se faz necessário apenas exportar esses valores e filtrar o ganho máximo da antena em cada uma das posições de interesse. Esse processo é repetido e os valores máximos de ganho em cada angulação de ϕ ou θ são agrupados em uma tabela no *Excel* e finalmente o diagrama de irradiação vertical ou horizontal é gerado.

Os valores medidos em laboratório e os simulados foram inseridos em um mesmo arquivo no *Excel* e todo o processo de elaboração de gráficos foi feito utilizando esse programa. Vale ressaltar que raramente os valores simulados se igualarão aos valores obtidos em laboratório, visto que o HFSS considera condições ideais para a propagação do sinal. Na prática, existem vários fatores que interferem no sinal emitido por uma antena. Por esse motivo, no presente trabalho os gráficos obtidos com as medições em laboratório foram normalizados com os resultados adquiridos no *software*. Esses traçados foram sobrepostos, com o intuito de facilitar a visualização da proximidade dos resultados.

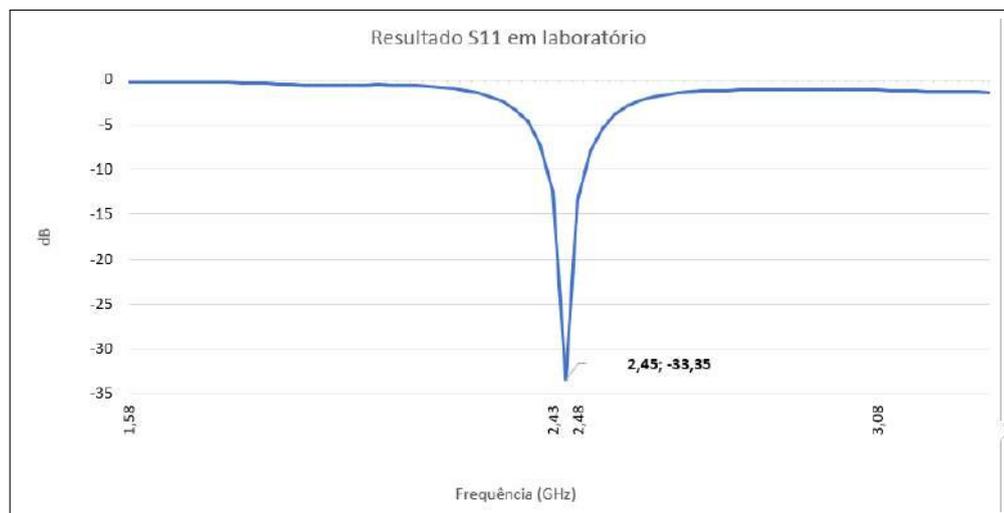
5 RESULTADOS

Neste Capítulo são apresentados os valores gráficos obtidos com as medições em laboratório e com a simulação realizada no HFSS. Com esses dados é possível comprovar visualmente os cortes nos planos de medição que são tão comentados ao longo do projeto. Os problemas que apareceram e como eles foram contornados também são descritos no Capítulo.

5.1 MEDIÇÕES EM LABORATORIO

Em laboratório o sinal irradiado pela antena em cada uma das posições foi mostrado no analisador de redes e salvo em um formato compatível com o Excel, programa utilizado para gerar os gráficos. Para obter o diagrama polar da antena tornou-se necessário medir o coeficiente de reflexão (S11) do equipamento para ter conhecimento da frequência de ressonância, uma vez que o analisador de redes disponibiliza o S11 em função da frequência. Tem-se na Figura 14 o gráfico do S11 criado através do Excel com os valores fornecidos pelo analisador de redes em laboratório.

Figura 14 – Coeficiente de reflexão da antena obtido em laboratório



FoNTE: Produzida pela autora

Percebe-se que a frequência de ressonância da antena é de 2,45 GHz. Com esse valor determinado, é possível gerar o diagrama polar da antena coletando o coeficiente de transmissão (S21) em cada posição de ϕ ou de θ para uma frequência de 2,45 GHz. Para exemplificar, será utilizado os resultados obtidos na polarização vertical (AVV), já

demonstrada na Figura 10. Para essas condições, o ϕ é fixado em 90° e o θ é variado de 0° a 360° . Assim, a termos de exemplificação, para $\theta = 90^\circ$, têm-se uma amostra dos resultados na Tabela 2.

Tabela 2 – Amostra de resultados para $\theta = 90^\circ$ em polarização AVV

Frequência (GHz)	S21 (dB)
2,35	-40,52
2,38	-43,20
2,40	-39,62
2,43	-39,84
2,45	-42,45
2,48	-41,69
2,50	-44,21
2,53	-44,95
2,55	-45,31
2,58	-46,5
2,60	-48,04

FoNTE: Produzida pela autora.

Verifica-se que em 2,45 GHz o S21 equivale a -42,45 dB para $\theta = 90^\circ$. Esse processo é repetido para todas as angulações de θ e o gráfico referente a essas condições está representado na Figura 15.

Figura 15 – Diagrama polar AVV



FoNTE: Produzida pela autora

Com o objetivo de obter o gráfico AHV, cuja orientação da antena corneta é o

sentido vertical e a antena planar o sentido horizontal, conforme a Figura 11, foi fixado θ em 90° e variado o ϕ de 0° a 360° . Assim, a termos de exemplificação para essas condições, uma amostra dos valores de S21 para $\phi = 0^\circ$ encontra-se na Tabela 3.

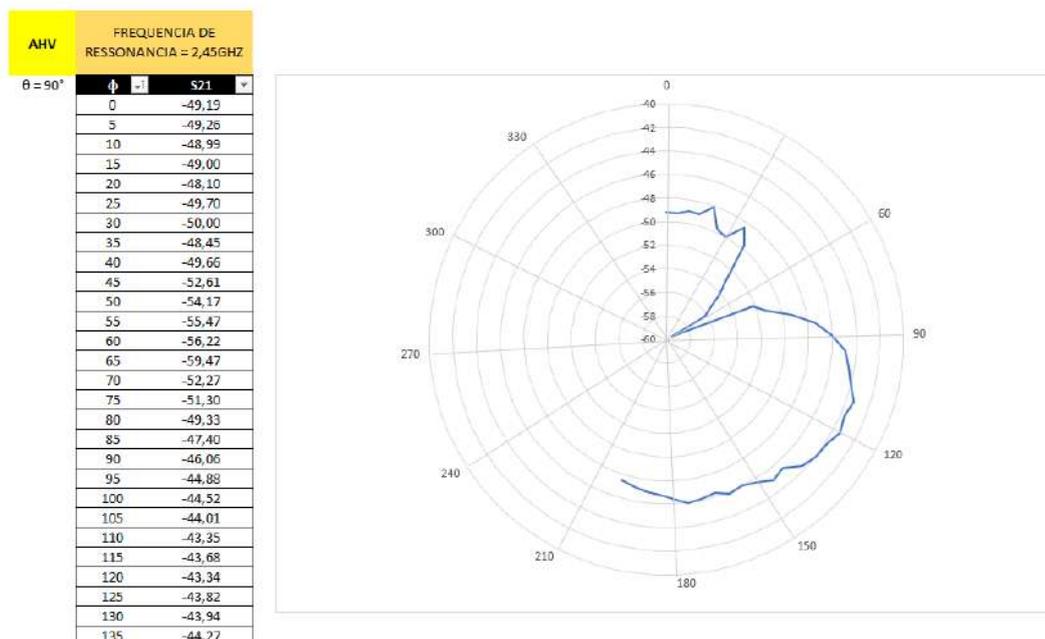
Tabela 3 – Amostra de resultados para $\phi = 0^\circ$ em polarização AHV

Frequência (GHz)	S21 (dB)
2,35	-52,26
2,37	-51,42
2,40	-46,38
2,42	-47,40
2,45	-49,19
2,47	-45,57
2,50	-47,95
2,52	-49,69
2,55	-49,97
2,57	-50,44
2,60	-52,08

FoNTE: Produzida pela autora.

Percebe-se então que em 2,45 GHz o S21 equivale a -49,19 dB para $\phi = 0^\circ$. Esse processo é repetido para todas as angulações de ϕ e o gráfico referente a essas condições está representado na Figura 16.

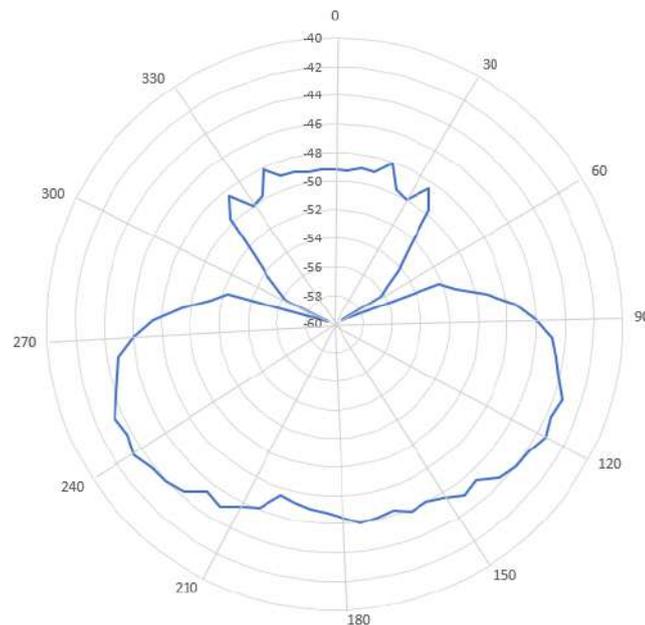
Figura 16 – Diagrama polar AHV



FoNTE: Produzida pela autora

Durante a medição dos valores na polarização AHV, parte dos arquivos foram corrompidos, o que acarretou em resultados de S21 apenas até $\phi = 200^\circ$. Isso explica o octante em branco no diagrama presente na Figura 16. No entanto, como trata-se de resultados simétricos, os valores medidos em laboratório foram rebatidos para apresentar o gráfico completo, a fim de facilitar o comparativo dos gráficos resultantes dos valores medidos em laboratório e os simulados no HFSS. Após realizado esse ajuste, o gráfico AHV obtido encontra-se na Figura 17.

Figura 17 – Diagrama polar AHV apos resultados rebatidos



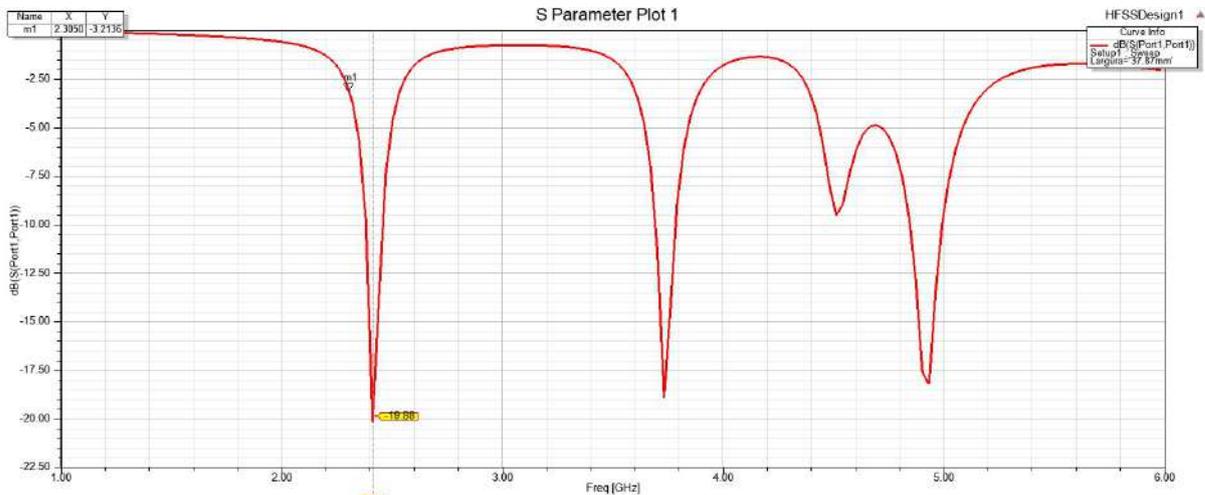
FoNTE: Produzida pela autora

Ao observar os gráficos das polarizações AVV e AHV, conforme Figuras 15 e 17, respectivamente, é possível perceber que o valor máximo para o coeficiente de transmissão é maior na polarização vertical AVV do que na polarização AHV. Isso ocorre porque na polarização vertical ambas as antenas encontram-se direcionadas verticalmente, que é exatamente onde resulta no valor máximo de S21. o mesmo ocorreria caso ambas as antenas estivessem no sentido horizontal. Em contrapartida, para gerar os resultados da polarização AHV, as antenas encontram-se em sentidos diferentes, não sendo possível alcançar um valor maior de S21 do que o obtido em polarização vertical AVV.

5.2 SIMULAÇÕES NO HFSS

A antena planar utilizada foi simulada no *software* conforme a Figura 13. O método de obtenção do diagrama polar utilizando o HFSS difere dos passos seguidos com os resultados adquiridos em laboratório, porque o *software* gera automaticamente esse diagrama baseando-se na frequência de ressonância que o próprio programa fornece. Assim, inicialmente foi gerado o gráfico que demonstra o coeficiente de reflexão da antena simulada, presente na Figura 18.

Figura 18 – Coeficiente de reflexão da antena simulado no HFSS



FoNTE: HFSS

Nota-se que a frequência de ressonância da antena simulada é de 2,41 GHz, sendo aproximada à resultante nas medições em laboratório. Tendo conhecimento dessa informação é adicionado ao software o valor de 2,41 GHz e, conseqüentemente, o HFSS se torna apto a gerar os diagramas polares da antena. Para isso, é preciso modificar manualmente a angulação de θ ou de ϕ .

Assim, para gerar o gráfico de polarização vertical da antena é preciso cortar o diagrama em $\phi = 90^\circ$ e o HFSS irá fornecer os valores de ganho para as angulações de θ . Sabendo disso, a Tabela 4 refere-se a uma amostra dos resultados obtidos no *software* quando $\phi = 90^\circ$ e o θ é variado de 5° em 5° .

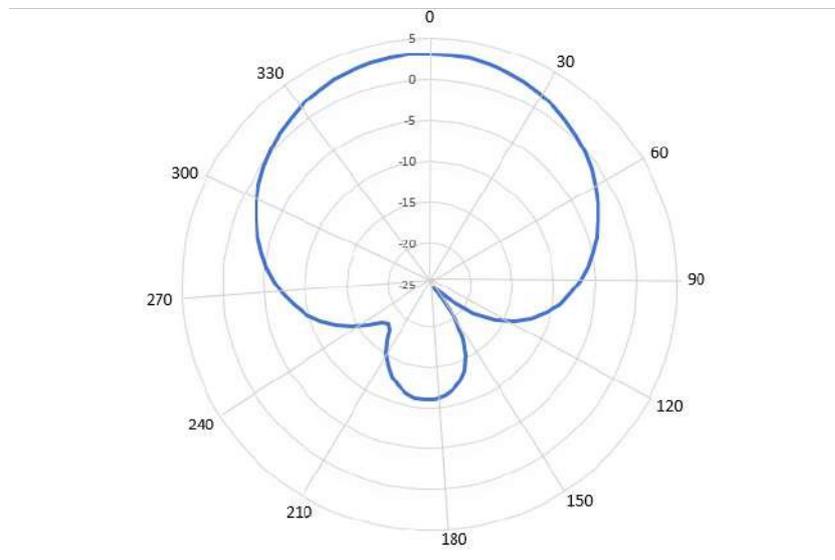
Tabela 4 – Amostra de resultados obtidos no HFSS para os valores de θ com ϕ fixado em 90°

θ	Ganho (dB)
0	3,12
5	3,09
10	2,98
15	2,81
20	2,56
25	2,24
30	1,87
35	1,42
40	0,92

FoNTE: Produzida pela autora.

o HFSS é bastante completo e fornece alternativas para exportar esses dados para uma planilha no Excel, facilitando o processo para gerar o diagrama de irradiação. Após a exportação, o gráfico referente a essas condições é mostrado na Figura 19.

Figura 19 – Gráfico para a variação de θ com ϕ fixado em 90°



FoNTE: Produzida pela autora

Em seguida, foi fixado o θ em 90° e variado o ϕ de 5° em 5° , com o objetivo de realizar o corte no diagrama referente ao sentido horizontal. A Tabela 5 possui uma amostra desses resultados obtidos através do HFSS.

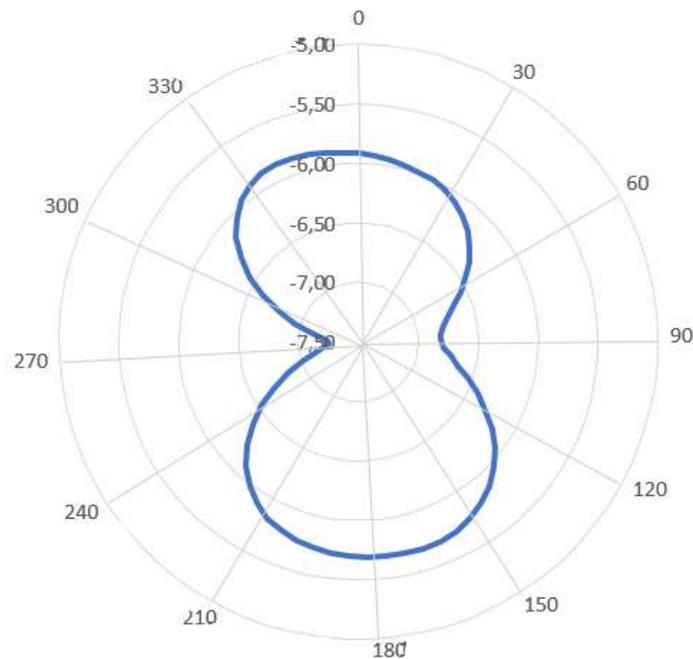
Tabela 5 – Amostra de resultados obtidos no HFSS para os valores de ϕ com θ fixado em 90°

ϕ	Ganho (dB)
0	-5,91
5	-5,93
10	-5,94
15	-5,97
20	-5,98
25	-6,01
30	-6,04
35	-6,08
40	-6,13

FoNTE: Produzida pela autora.

Com esses valores exportados para o Excel foi possível gerar o gráfico polar para essas condições, conforme a Figura 20.

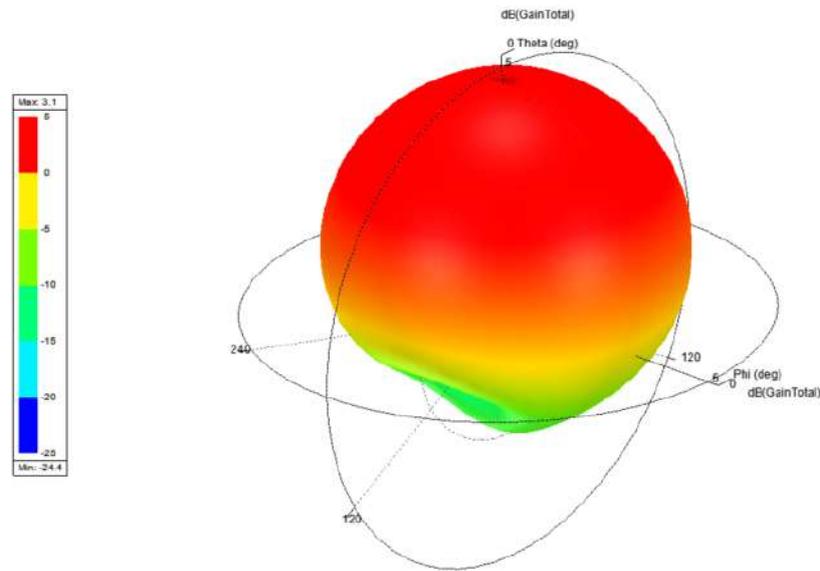
Figura 20 – Gráfico para a variação de ϕ com θ fixado em 90°



FoNTE: Produzida pela autora.

Para um melhor entendimento do porquê os gráficos polares são representados de forma tão diferente a depender do sentido em que as antenas se encontram, vale conferir o diagrama tridimensional, uma vez que facilita a visualização dos cortes realizados nesse gráfico. No HFSS isso é possível, visto que o *software* disponibiliza o gráfico 3D da antena, conforme Figura 21.

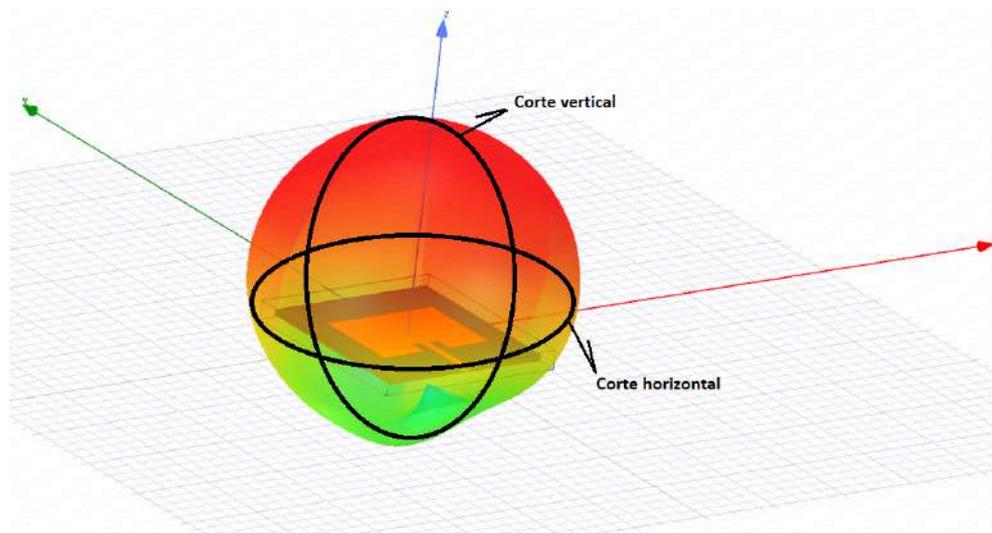
Figura 21 – Diagrama tridimensional da antena simulada



FoNTE: HFSS

Analisando esse gráfico é possível visualizar os cortes que foram feitos no diagrama, que se encontram mais destacados na Figura 22.

Figura 22 – Cortes nos planos de medição



FoNTE: Produzida pela autora

5.3 COMPARANDO RESULTADOS

Em termos reais é mais prático visualizar os cortes nos planos através da análise dos diagramas tridimensionais da antena. Como um dos objetivos do presente projeto é demonstrar, por meios experimentais, como esses cortes funcionam, os resultados obtidos em laboratório foram sobrepostos aos resultados adquiridos na simulação.

Sabe-se que as simulações não consideram as interferências que o sinal sofre quando são feitos testes práticos e reais, porém é possível equipará-los, os deixando proporcionais e na mesma escala. No presente trabalho, isso foi possível após realizar a normalização dos resultados obtidos em laboratório com os fornecidos pelo HFSS.

Para a normalização ser bem sucedida foi necessário determinar uma constante de normalização. Para isso, o módulo máximo do ganho simulado foi somado ao módulo máximo do S21 dos valores práticos. Em seguida, somou-se essa constante com o módulo do S21 obtido em laboratório em cada angulação.

Para demonstrar esse processo será usado os dados do AVV medido e simulado. Sabendo-se que o máximo do ganho simulado é igual a 3,12 dB e o máximo S21 medido em laboratório é igual a -30,52 dB, após a soma desses valores a constante de normalização equivale a 33,64 dB. Assim, o próximo passo é somar essa constante ao valor de S21 medido em laboratório para toda angulação de θ , a fim de proporcionalizar esses resultados com os obtidos na simulação. ou seja, se antes da normalização o S21 para a polarização AVV em $\theta = 0^\circ$ for igual a -30,95 dB, o resultado final de S21 normalizado após adicionar 33,64 dB a esse valor será de 2,69 dB. Uma amostra desses resultados finais para a polarização AVV encontra-se na Tabela 6.

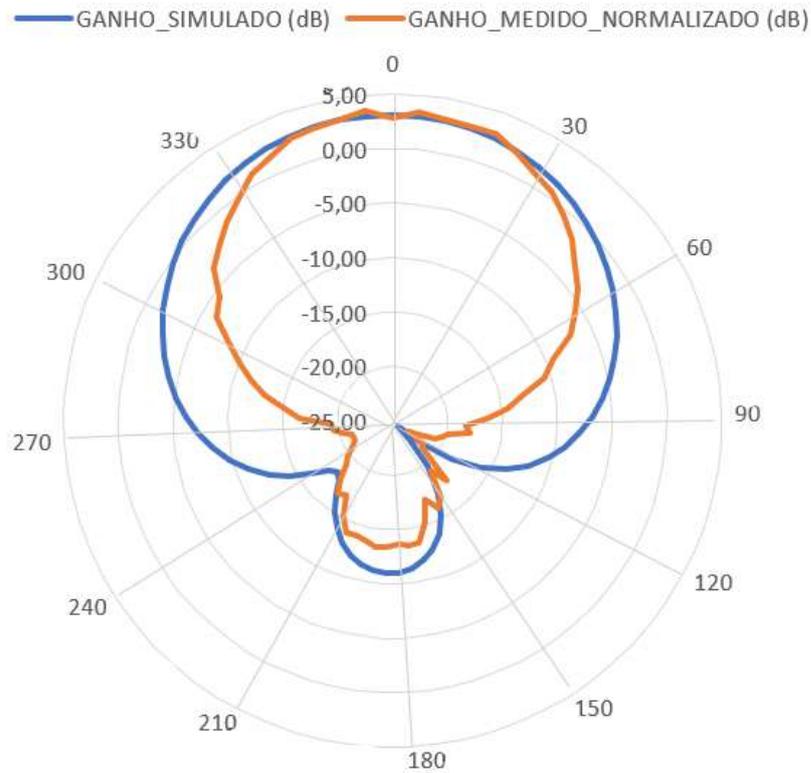
Tabela 6 – Amostra dos resultados de S21 da polarização AVV após a normalização

θ	S21 (dB)
0	2,69
5	3,07
10	2,89
15	2,80
20	2,77
25	2,26
30	1,68
35	1,35
40	0,68

FoNTE: Produzida pela autora.

Com os resultados proporcionalizados, torna-se possível compará-los com os valores simulados. Assim, o gráfico comparativo entre eles encontra-se na Figura 23.

Figura 23 – Gráfico comparativo da polarização AVV



FoNTE: Produzido pela autora

o processo citado acima repetiu-se para a polarização AHV. o máximo valor de S21 medido em laboratório nessa polarização foi de 43,34 dB, enquanto que o ganho máximo simulado resultou em 5,68 dB. Esses valores foram somados, resultando na constante de normalização igual a 49,02 dB. Assim como realizado para a polarização vertical, essa constante foi somada ao S21 medido em laboratório para os valores de ϕ , conforme amostra de resultados presentes na Tabela 7.

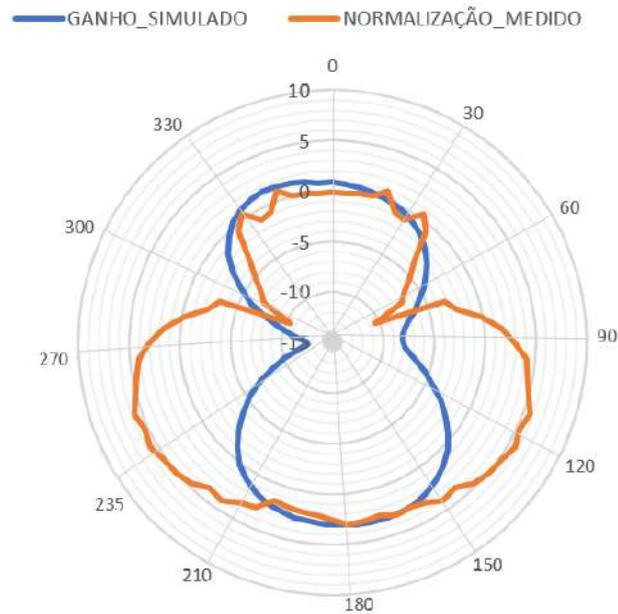
Tabela 7 – Amostra dos resultados de S21 da polarização AHV apos a normalização

ϕ	S21 (dB)
0	-0,17
5	-0,24
10	0,03
15	0,02
20	0,92
25	-0,68
30	-0,98
35	0,57
40	-0,64

FoNTE: Produzida pela autora.

Com os resultados proporcionalizados, torna-se possível compará-los com os valores simulados. Assim, o gráfico comparativo entre eles encontra-se na Figura 24.

Figura 24 – Gráfico comparativo da polarização AHV



FoNTE: Produzido pela autora

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, realizou-se a análise de diagramas de irradiação de uma antena planar, cuja representação gráfica originalmente é tridimensional. No entanto, não é muito prático obter experimentalmente gráficos em 3D. A solução, então, é gerar diagramas bidimensionais por meio de cortes nos planos de medição (plano x-y e plano y-z ou x-z) de um diagrama em 3D.

Para o projeto ser bem sucedido foi necessário realizar as medições da antena planar em laboratório e em simulações computacionais utilizando o *software* ANSYS HFSS. A antena de estudo foi disposta no espaço em angulações diferentes de ϕ e de θ , variando de 5° em 5° , além de submeter a antena a polarizações diferentes, denominadas de AVV E AHV pela autora. O mesmo processo foi feito no HFSS, a fim de comparar os resultados obtidos em laboratório e nas simulações.

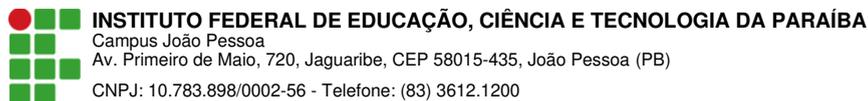
Esse comparativo é muito importante, uma vez que geralmente os estudos referentes a diagramas de irradiação em antenas são feitos usando das ferramentas computacionais de simulação, por ser mais intuitivo na compreensão dos cortes nos planos de medição. Isso ocorre, porque o *software* disponibiliza facilmente o diagrama em 3D, então o entendimento de como foi gerado os diagramas bidimensionais se torna mais evidente. Dito isso, essa relação entre diagrama 3D e 2D não é algo frequentemente visualizado em testes práticos, tornando a compreensão dos diagramas vertical e horizontal mais limitada. Assim, ao realizar a comparação entre resultados medidos em laboratório e em simulações, torna-se visível a similaridade nos resultados e nos traçados obtidos nos gráficos.

Dessa forma, o desenvolvimento deste trabalho tornou possível a visualização dos cortes feitos nos planos de medição, comprovando que independentemente da preferência do método de estudo, seja ele feito por meio de testes práticos ou simulados, os resultados serão sempre proporcionais. Ademais, foi possível entender a relação dos ângulos θ e ϕ com os diagramas vertical ou horizontal de uma antena. Em suma, o projeto realizado ampliou os conhecimentos em um tema aparentemente simples, mas detalhista.

A necessidade de utilizar um *software* nunca antes utilizado pela autora foi uma dificuldade finalmente contornada. O processo de relacionar os dados obtidos em laboratório com os dados simulados pelo HFSS complementou o conhecimento adquirido ao decorrer deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, F. F. d. **Desenvolvimento de antenas planares reconfiguráveis em estruturas com metasuperfícies**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio grande do Norte, Brasil, 2017.
- BALANIS, C. A. **Teoria de Antenas: Análise e síntese**. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2005. 345 p.
- HUIDOBRO, J. M. Antenas de telecomunicaciones. **Revista digital de acta**, v. 2, 2013.
- MOTA, V. L. G. Desenvolvimento de um sistema de medição para o levantamento do digrama de irradiação de antenas impressas na faixa de onda milimétricas. trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal Fluminense, 2018.
- ROCHA, J. P. M.; MENDES, J.; LIMA, J.; SILVA, C.; NETO, A. Caracterização e confecção de uma antena de microfita para recepção de tv digital e aplicação em notebooks através do ansoft hfss. **Revista principia. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba**, 2012.
- SILVA, J. C. da. **Influência da Vegetação no Desvanecimento e na Perda de Percurso de Enlaces de Radiocomunicação UHF na Faixa de 700 MHz**. Tese (Doutorado) — PhD thesis, PUC-Rio, 2014.
- SILVEIRA, R. V. L. da; SILVA, S. D. Um estudo teórico sobre o uso das antenas de microfita. In: **III CONEDU-Congresso Nacional de Educação**. [S.l.: s.n.], 2016.



Documento Digitalizado Restrito

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Assunto: TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
Assinado por: Julia Leite
Tipo do Documento: Relatório
Situação: Finalizado
Nível de Acesso: Restrito
Hipótese Legal: Informação Pessoal (Art. 31 da Lei no 12.527/2011)
Tipo do Conferência: Cópia Simples

Documento assinado eletronicamente por:

- **Júlia Leite Bezerra de Melo, ALUNO (20171610014) DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - JOÃO PESSOA**, em 16/02/2023 11:12:43.

Este documento foi armazenado no SUAP em 02/03/2023. Para comprovar sua integridade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/verificar-documento-externo/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 763078
Código de Autenticação: 2a1667ba48

