



Universidade Federal de Ouro Preto  
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas  
Departamento de Engenharia Elétrica

## **Trabalho de Conclusão de Curso**

# **Síntese do campo da abertura de antenas offset para prover cobertura do território brasileiro**

Sávio Vieira Lacerda da Silva

**Junho, 2021**  
**João Monlevade, MG**

**Sávio Vieira Lacerda da Silva**

**Síntese do campo da abertura de antenas offset  
para prover cobertura do território brasileiro**

Orientador: Profa. Dra. Aline Rocha de Assis

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica pelo Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas da Universidade Federal de Ouro Preto.

**Universidade Federal de Ouro Preto**

**João Monlevade**

**Junho de 2021**

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S586s Silva, Sávio Vieira Lacerda da .  
Síntese do campo da abertura de antenas offset para prover cobertura do território brasileiro. [manuscrito] / Sávio Vieira Lacerda da Silva. - 2021.

53 f.: il.: color., gráf., mapa.

Orientadora: Profa. Dra. Aline Rocha de Assis.  
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.  
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas. Graduação em Engenharia Elétrica .

1. Campos elétricos. 2. Comunicação - Satélites artificiais. 3. Fourier, Transformadas de. 4. Polinômios . I. Assis, Aline Rocha de. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 621.3

Bibliotecário(a) Responsável: Flavia Reis - CRB6-2431



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO  
REITORIA  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E APLICADAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELETRICA



## FOLHA DE APROVAÇÃO

Sávio Vieira Lacerda da Silva

### Síntese do campo da abertura de antenas offset para prover cobertura do território brasileiro

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista

Aprovada em 01 de julho de 2021

#### Membros da banca

Dra - Aline Rocha de Assis - Orientadora - Universidade Federal de Ouro Preto  
Dra - Fernanda Rodrigues da Silva - Universidade Federal de Itajubá  
Me - Felipe Eduardo Moreira Cota - Universidade Federal de Ouro Preto

Aline Rocha de Assis, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 20/07/2021



Documento assinado eletronicamente por **Aline Rocha de Assis, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 20/07/2021, às 15:29, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0196209** e o código CRC **2A4F890F**.

Referência: Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.006698/2021-05

SEI nº 0196209

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35400-000  
Telefone: - www.ufop.br

# Agradecimentos

Agradeço aos meus familiares por terem me apoiado e fomentado a busca por conhecimento o que me fez chegar até aqui. Em especial, a meu pai, Jordelino Silva, por ter dado todo o suporte necessário; a minha mãe, Aldair Silva, por todo amor e carinho que, mesmo distante, sempre conseguiram me alcançar e a minha irmã, Jordânia Silva, por seu companheirismo e irmandade.

Aos meus amigos, que sempre estiveram presentes em minha vida, proporcionando-me momentos de alegria e motivação.

À Universidade Federal de Ouro Preto, por todo apoio, ensino de qualidade e custeio necessário para a minha permanência no curso de Engenharia Elétrica. Ao Banco Santander e à Universidade do Porto, por ter proporcionado a realização de meu intercâmbio, do qual saí transformado e com outra visão de mundo.

Aos meus professores do ensino básico, maiores incentivadores para que eu me esforçasse e conseguisse entrar em uma universidade pública e gratuita. Aos meus professores da graduação, em especial, à professora Sarah Leite, que considero como minha tutora em todo o percurso acadêmico e à minha professora orientadora, Aline Assis, por ter sido essa professora incrível, paciente e compreensiva em todos os momentos complicados vivenciados nessa reta final da graduação.

# Resumo

O presente trabalho apresenta um método matemático para obter o campo ideal desejado na abertura de uma antena offset, embarcada em um satélite artificial, a partir de uma cobertura definida em projeto. Com o campo da abertura encontrado, é possível projetar uma antena de forma a iluminar grandes regiões, em que o sinal transmitido é entregue simultaneamente a vários pontos localizados dentro dessa região. O método utilizado aplica a transformada de Fourier nos polinômios de Zernike para reconstrução do campo distante e os polinômios de Zernike para a obtenção do campo na abertura. Em ambiente computacional, foram feitos dois estudos de caso para analisar o método e o algoritmo implementado. No primeiro estudo de caso, fez-se a análise com uma área de cobertura proposta e solucionada na literatura; já no segundo estudo de caso, a cobertura utilizada é a mesma do satélite Star One C3, que ilumina o território brasileiro. Por fim, os resultados obtidos, via simulação em ambos os estudos de caso, foram analisados para verificar a sua viabilidade prática.

**Palavras-chaves:** antena de abertura, comunicação via satélite, polinômios de Zernike, transformada de Fourier.

# Abstract

This paper presents a mathematical method to obtain the optimal field desired at the aperture of an offset antenna, on board an artificial satellite, from a coverage defined in project. With the aperture field found, it is possible to design an antenna to illuminate large regions, where the transmitted signal is delivered simultaneously to several points located within that region. The method used applies the Fourier transform to the Zernike polynomials to reconstruct the far field and the Zernike polynomials to obtain the field at the aperture. In a computational environment, two case studies were done to analyze the method and the implemented algorithm. In the first case study, the analysis was done with a coverage area proposed and solved in the literature; in the second case study, the coverage used is the same as that of the Star One C3 satellite, which illuminates the Brazilian territory. Finally, the results obtained, via simulation in both case studies, were analyzed to verify their practical feasibility.

**Key-words:** aperture antenna, satellite communication, Zernike polynomials, Fourier transform.

# Lista de ilustrações

Figura 1 – Ilustração de uma antena localizada em um satélite artificial iluminando o território brasileiro . . . . .	15
Figura 2 – Configurações de antenas filamentosas . . . . .	17
Figura 3 – Configurações de antenas de abertura . . . . .	18
Figura 4 – Antenas de plaquetas de microfita retangular e circular . . . . .	18
Figura 5 – Configurações dos conjuntos de antenas . . . . .	19
Figura 6 – Refletor parabólico com alimentador frontal . . . . .	19
Figura 7 – Geometria de uma antena offset duplo-refletora . . . . .	20
Figura 8 – Diagrama de radiação . . . . .	21
Figura 9 – Abertura retangular . . . . .	24
Figura 10 – Abertura circular . . . . .	25
Figura 11 – Análise apresentada por Westcott . . . . .	28
Figura 12 – Representação dos primeiros 21 polinômios de Zernike . . . . .	30
Figura 13 – Representação das primeiras 21 transformadas de Fourier dos polinômios de Zernike . . . . .	32
Figura 14 – Especificação da cobertura - Estudo de caso 1 . . . . .	36
Figura 15 – Coeficientes Zernike - Estudo de Caso 1 . . . . .	36
Figura 16 – Campo na abertura - Estudo de Caso 1 . . . . .	37
Figura 17 – Cobertura reconstruída - Estudo de caso 1 . . . . .	37
Figura 18 – Resultado teorema de Malus - Estudo de Caso 1 . . . . .	38
Figura 19 – Campo distante e campo na abertura para um sistema ideal . . . . .	39
Figura 20 – Foto da preparação para o lançamento do Star One C3 para a órbita da Terra . . . . .	40
Figura 21 – Foto do Star One C3 na órbita da Terra . . . . .	40
Figura 22 – Ganho de polarização da cobertura . . . . .	41
Figura 23 – Coeficientes de Zernike - Estudo de Caso 2 . . . . .	41
Figura 24 – Campo na abertura - Estudo de Caso 2 . . . . .	42
Figura 25 – Cobertura - Estudo de Caso 2 . . . . .	42
Figura 26 – Resultado teorema de Malus - Estudo de Caso 2 . . . . .	43

# Lista de abreviaturas e siglas

**Anatel** Agência Nacional de Telecomunicações

**ITU** *International Telecommunication Union*

**TEM** transversais eletromagnéticas

**UHF** *Ultra High Frequency*

# Lista de símbolos

$R$	Distância da antena a região de fronteira
$d$	Dimensão da antena
$\lambda$	Comprimento de onda
$\vec{\mathcal{W}}$	Vetor de Poynting instantâneo
$\vec{\mathcal{E}}$	Intensidade de campo elétrico instantâneo
$\vec{\mathcal{H}}$	Intensidade de campo magnético instantâneo
$\vec{\mathcal{P}}$	Potência total instantânea
$\hat{n}$	Vetor normal
$P_{rad}$	Potência radiada
$W_{rad}$	Densidade de radiação
$D$	Diretividade
$U$	Intensidade de radiação
$U_0$	Intensidade de radiação de uma fonte isotrópica
$U_{max}$	Intensidade máxima de radiação
$G$	Ganho
$P_{in}$	Potência entregue à antena
$E_a$	Campo na abertura
$E_0$	Campo constante
$\hat{a}_y$	Vetor unitário na direção de $y$
$a$	Parâmetro da abertura retangular
$b$	Parâmetro da abertura retangular
$c$	Parâmetro da abertura circular
$k$	Constante de propagação

$J_1$	Função de Bessel de primeira espécie e ordem um
$k_x$	Frequência espectral em $x$
$k_y$	Frequência espectral em $y$
$W(r, \theta)$	Frente de onda arbitrária em coordenadas polares
$C_n^m$	Coefficientes de Zernike
$Z_n^m$	Polinômios de Zernike
$m$	Grau da polinômio
$n$	Ordem da polinômio
$R_n^m(r)$	Função radial dos polinômios de Zernike
$N_n^m$	Fator de normalização dos polinômios de Zernike
$U_i$	Transformada de Fourier dos Polinômios de Zernike
$Z_i$	Polinômios de Zernike com nomenclatura abreviada
$c_i$	Coefficientes de Zernike com nomenclatura abreviada
$k$	Ângulo esférico azimute
$\phi$	Ângulo esférico de elevação
$a(k, \phi)$	Região de cobertura
$l(x, y)$	Fase do campo da abertura
$l_x$	Derivada da fase em relação a $x$
$l_y$	Derivada da fase em relação a $y$
$N_x$	Derivada da função $N$ em relação a $x$
$N_y$	Derivada da função $N$ em relação a $y$
$D_x$	Derivada da função $D$ em relação a $x$
$D_y$	Derivada da função $D$ em relação a $y$

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>13</b>
<b>1.1</b>	<b>O Problema de Pesquisa</b>	<b>14</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos</b>	<b>14</b>
1.2.1	Objetivos Específicos	14
<b>1.3</b>	<b>Organização do Trabalho</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>17</b>
<b>2.1</b>	<b>Tipos de Antenas</b>	<b>17</b>
<b>2.2</b>	<b>Parâmetros Fundamentais de Antenas</b>	<b>20</b>
2.2.1	Diagrama de Radiação	20
2.2.2	Regiões de Campo Radiado	21
2.2.3	Densidade de Potência Radiada	22
2.2.4	Diretividade e Ganho	22
2.2.5	Polarização	23
<b>2.3</b>	<b>Antenas de Abertura</b>	<b>23</b>
<b>2.4</b>	<b>Transformada de Fourier na Teoria de Antenas de Abertura</b>	<b>25</b>
2.4.1	Transformada de Fourier - Domínio Espectral	26
2.4.2	Cálculo Assintótico do Campo Radiado	26
<b>2.5</b>	<b>O Problema de Síntese do Campo na Abertura de uma Antena Offset</b>	<b>27</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>29</b>
<b>3.1</b>	<b>Polinômios de Zernike</b>	<b>29</b>
<b>3.2</b>	<b>Transformada de Fourier dos Polinômios de Zernike</b>	<b>31</b>
<b>3.3</b>	<b>Síntese do Campo na Abertura</b>	<b>32</b>
<b>3.4</b>	<b>Teorema de Malus</b>	<b>33</b>
<b>4</b>	<b>ESTUDOS DE CASOS</b>	<b>35</b>
<b>4.1</b>	<b>Estudo de Caso 1</b>	<b>35</b>
<b>4.2</b>	<b>Estudo de Caso 2</b>	<b>39</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>44</b>
<b>5.1</b>	<b>Considerações Finais</b>	<b>44</b>
<b>5.2</b>	<b>Propostas para Trabalhos Futuros</b>	<b>44</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>45</b>

<b>ANEXOS</b>	<b>47</b>
<b>ANEXO A – NORMAS E REGULAMENTAÇÃO . . . . .</b>	<b>48</b>
<b>ANEXO B – PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DO SATÉLITE STAR ONE C3 . . . . .</b>	<b>50</b>
<b>ANEXO C – ÁREA DE COBERTURA NA BANDA KU DO SATÉ- LITE STAR ONE C3 . . . . .</b>	<b>51</b>

# 1 Introdução

Nos últimos tempos, com a globalização, o fluxo de informações teve um aumento exponencial e, com isso, surgiu a necessidade de melhorar os meios por onde ela é transmitida. Antes da década de 1990, a comunicação em massa era baseada na imprensa, no cinema, no rádio e na televisão. A comunicação baseada na telefonia e na computação era considerada emergente na época (DEFLEUR; BALL-ROKEACH, 1993). A rede de computadores, conhecida hoje como Internet, ainda estava concentrada nos centros de pesquisa. À medida que as pessoas foram tendo acesso a esse tipo de tecnologia, ela começou a expandir e evoluir tecnologicamente em âmbito mundial (SILVEIRA, 2004). Dentre os principais meios utilizados para transportar informações estão os pares metálicos, cabos coaxiais, fibra óptica, sinais de rádio e os satélites. Neste trabalho, destacam-se o funcionamento e a contribuição dos satélites artificiais e das antenas que os compõem.

Em sistemas de telecomunicações, a antena é um dispositivo para radiar ou captar ondas eletromagnéticas no meio circundante (ANATEL, 2018). A antena também pode ser definida como um dispositivo para a radiação ou a recepção de ondas de rádio (BALANIS, 2008a). Em outras palavras, as antenas são utilizadas no sistema de telecomunicações para transmitir e receber informações sem fio. Em 1886, Heinrich Rudolf Hertz criou o primeiro sistema de rádio, que consistia em um transmissor e um receptor. Ele comprovou a teoria de James Clerk Maxwell que antes, na década de 1860, já previu a existência de ondas eletromagnéticas em radiofrequências, unificando a eletricidade e o magnetismo em eletromagnetismo (VISSER, 2015). Após quase um século, em 4 de outubro de 1957, durante o período que aconteceu a Guerra Fria, a União Soviética enviou o primeiro lançamento de um satélite artificial, o Sputnik 1, para a órbita terrestre. Esse marco foi muito importante para o início da corrida espacial.

Entre os meios utilizados para o tráfego de informações, os satélites têm bastante destaque devido a sua região de cobertura. Regiões remotas onde o acesso à internet por meio da infraestrutura cabeada é muito difícil e/ou tem um custo muito elevado devido às condições geográficas, como o interior da floresta Amazônica, localizada no Brasil, para esse caso, é o meio de comunicação mais indicado. Os satélites funcionam como repetidores de sinal, recebendo e retransmitindo sinais de um ponto a outro da região de cobertura.

Atualmente, a Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel), agência reguladora dos serviços de telecomunicações do Brasil, autoriza a operação comercial de 34 satélites estrangeiros e 18 satélites brasileiros. Entre as empresas responsáveis pelo controle e monitoramento em território nacional, a Embratel TVSAT Telecomunicações é a que detém maior quantidade de satélites licenciados, possuindo 7 já em órbita e 1 aguardando

lançamento (ANATEL, 2021).

## 1.1 O Problema de Pesquisa

As configurações das antenas embarcadas nos satélites, além de seguirem normas e regulamentações impostas pela Anatel, as quais são informadas no Anexo A, devem atender os requisitos técnicos propostos para a sua aplicação de maneira eficaz e eficiente, uma vez que a sua manutenção após o lançamento é impraticável. O requisito de maior destaque é projetar uma antena que ilumine toda a região de cobertura definida em projeto, com um ganho mínimo que garanta o tráfego de informações entre o satélite e as estações terrenas. Em regiões com uma concentração populacional maior, é de interesse comercial ter um ganho mais elevado. Por exemplo, as capitais da Região Sudeste concentram 44,6% da população das capitais brasileiras (IBGE, 2011), então, é conveniente que essa região possua um ganho mais elevado do que as outras regiões.

A Figura 1 ilustra uma representação da região de cobertura do território brasileiro por um satélite geostacionário. Dada essa cobertura, o grande desafio é projetar uma antena que ilumine todo o território especificado, evitando o transbordamento da energia proveniente do satélite para as regiões adjacentes. Para a solução desse problema, os trabalhos encontrados na literatura propõem duas metodologias principais. A primeira consiste em determinar um conjunto de alimentadores de um sistema de refletores para a obtenção do campo especificado na região de cobertura; enquanto que a segunda metodologia consiste no projeto dos refletores. Em ambos os casos, é necessário determinar uma variável intermediária, ou seja, o campo da abertura da antena, que gera o campo eletromagnético desejado na região de cobertura. Com isso, neste trabalho é proposta uma metodologia para a solução de um problema de síntese, isto é, para a obtenção do campo da abertura de uma antena offset a partir de uma especificação na região de cobertura. O campo sintetizado deverá atender aos princípios da Óptica Geométrica (Teorema de Malus), visando compor o algoritmo proposto em Assis (2020) para a síntese de um sistema offset.

## 1.2 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo geral obter o campo ideal desejado na abertura de uma antena offset de tal modo que o sinal ilumine o território brasileiro de forma eficiente.

### 1.2.1 Objetivos Específicos

Para conseguir cumprir com o objetivo geral, é necessário estabelecer alguns objetivos específicos, quais sejam:

Figura 1 – Ilustração de uma antena localizada em um satélite artificial iluminando o território brasileiro



Fonte: Adaptado de Moreira (1992, p. 3)

- Estudar os conceitos introdutórios de antenas de abertura.
- Estudar os coeficientes da transformada de Fourier para representar o campo distante de uma antena refletora.
- Estudar os polinômios de Zernike para representar o campo na abertura de uma antena refletora.
- Realizar a síntese do campo da abertura ideal para cobertura do território brasileiro.
- Analisar o campo da abertura ideal obtido.

### 1.3 Organização do Trabalho

O Capítulo 2 apresenta inicialmente uma revisão bibliográfica dos tipos e parâmetros fundamentais de antenas de forma geral. Nesse capítulo, também são estudados, com um pouco mais de detalhe, a antena de abertura e os campos na região de campo distante e na região da abertura. Concluindo o capítulo, são apresentados alguns métodos para a solução do problema de síntese.

No Capítulo 3 estuda-se a metodologia adotada para o desenvolvimento desse trabalho, quais sejam, os polinômios de Zernike e a transformada de Fourier para encontrar uma solução ideal dado o problema proposto.

No Capítulo 4 são feitos dois estudos de caso, utilizando a metodologia apresentada no Capítulo 3. No primeiro estudo de caso, são analisados os resultados encontrados em uma dada cobertura proposta e solucionada na literatura e; no segundo, a cobertura informada é a mesma utilizada pelo satélite artificial Star One C3.

Por fim, no Capítulo 5, são feitas as considerações finais e a proposta para trabalhos futuros.

## 2 Revisão Bibliográfica

Neste capítulo, fez-se uma breve introdução sobre alguns tipos clássicos de antenas e sobre os parâmetros fundamentais que a compõem, como o diagrama de radiação e sua diretividade. Em sequência, são descritas as principais características das antenas de abertura e o motivo pelo qual a mesma foi escolhida para integrar o satélite.

### 2.1 Tipos de Antenas

Existem diversos tipos de antenas, cada qual com sua aplicação. Nesse sentido, são listadas algumas delas:

- Antenas Filamentares: são as antenas mais comuns e estão presentes em diversos lugares, como em automóveis e prédios. Existem diversas configurações para as antenas filamentosas, como a dipolo e a em hélice, ilustradas na Figura 2.

Figura 2 – Configurações de antenas filamentosas



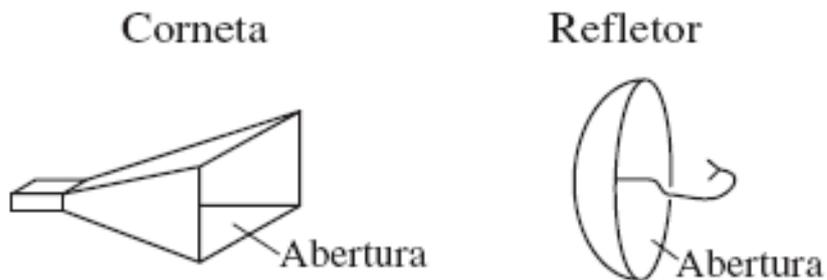
(a) Dipolo

(b) Hélice

Fonte: BALANIS (2008a, p. 2)

- Antenas de Abertura: são antenas utilizadas em aplicações espaciais e em frequências mais elevadas de trabalho. Esse tipo de antena permite formas geométricas mais sofisticadas, alguns exemplos podem ser vistos na Figura 3.

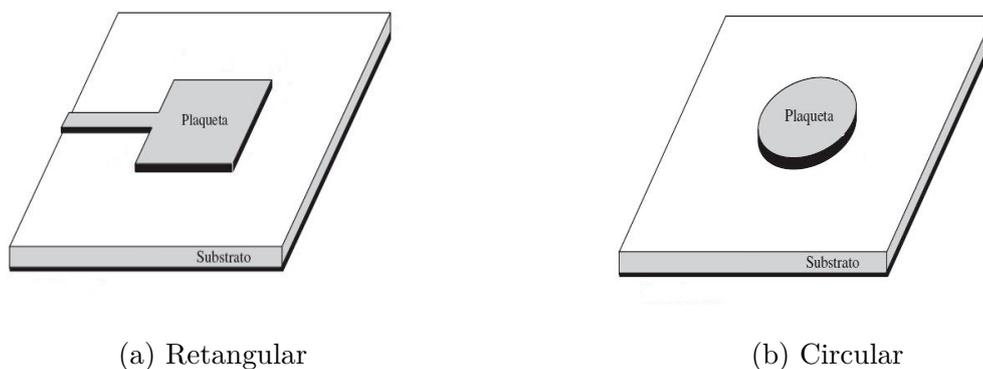
Figura 3 – Configurações de antenas de abertura



Fonte: STUTZMAN L. W.; THIELE (2016, p. 18)

- Antenas de Microfita: são utilizadas em telefones celulares entre outras aplicações presentes no nosso dia a dia; consistem em uma plaqueta metálica colocada sobre um substrato aterrado. A plaqueta pode possuir diversas formas geométricas, os formatos mais comuns são as circulares e as retangulares, conforme Figura 4.

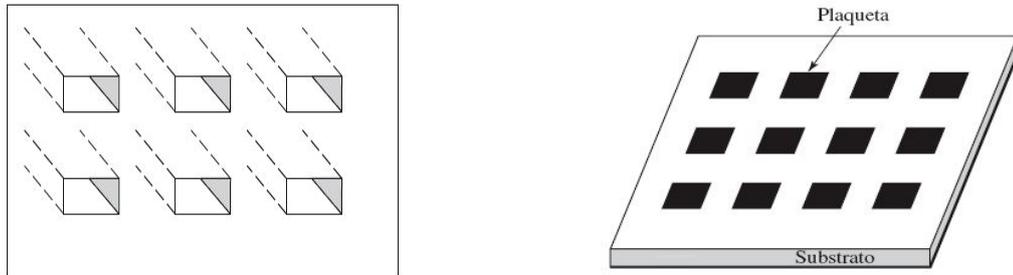
Figura 4 – Antenas de plaquetas de microfita retangular e circular



Fonte: Adaptado de BALANIS (2008a, p. 4)

- Conjunto de Antenas: são antenas similares ou de outros tipos, que são agrupadas para formar um conjunto. Alguns exemplos desse tipo de antena são apresentados na Figura 5.

Figura 5 – Configurações dos conjuntos de antenas



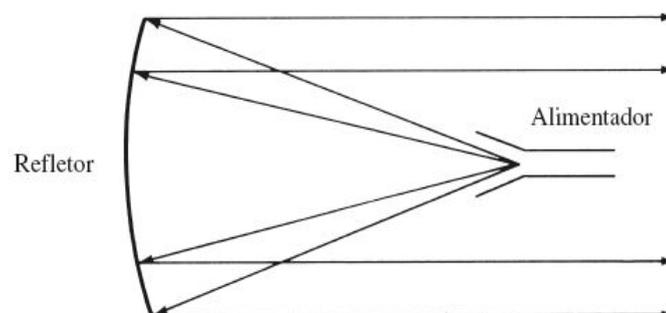
(a) Conjunto de aberturas

(b) Conjunto de plaquetas de microfita

Fonte: Adaptado de BALANIS (2008a, p. 4)

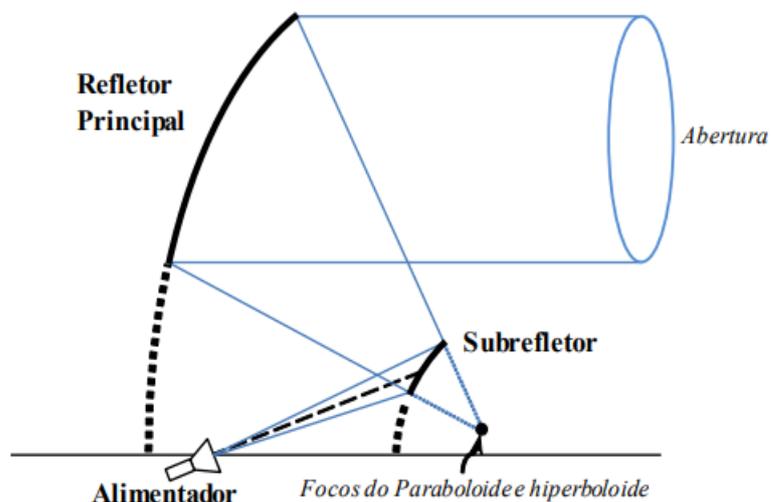
- Antenas Refletoras: são um tipo de antena de abertura e também muito utilizadas em comunicação via satélite. Antenas desse tipo são constituídas por superfícies refletoras que são iluminadas por um ou mais alimentadores. Uma configuração clássica desse tipo de antena é ilustrada na Figura 6, em que se tem um refletor parabólico com um alimentador frontal. Na Figura 7 ilustra-se uma configuração mais eficiente, conhecida como antena offset duplo-refletora, em que o alimentador não bloqueia a abertura, uma vez que o sinal é inicialmente direcionado para um subrefletor, antes de ser refletido pelo refletor principal.

Figura 6 – Refletor parabólico com alimentador frontal



Fonte: Adaptado de BALANIS (2008a, p. 5)

Figura 7 – Geometria de uma antena offset duplo-refletora



Fonte: Penchel (2014, p. 23)

## 2.2 Parâmetros Fundamentais de Antenas

Ao avaliar o funcionamento de uma antena, alguns parâmetros devem ser levados em consideração. O comportamento desses parâmetros muda com base na aplicação desejada, no local de instalação da antena, na frequência de uso, na área de cobertura, entre outros aspectos. Nesta seção, os parâmetros fundamentais discutidos são: diagrama de radiação, regiões de campo radiado, densidade e potência radiada, diretividade, ganho e polarização. Considere-se, ainda, que as equações utilizadas nesta seção foram demonstradas em BALANIS (2008a).

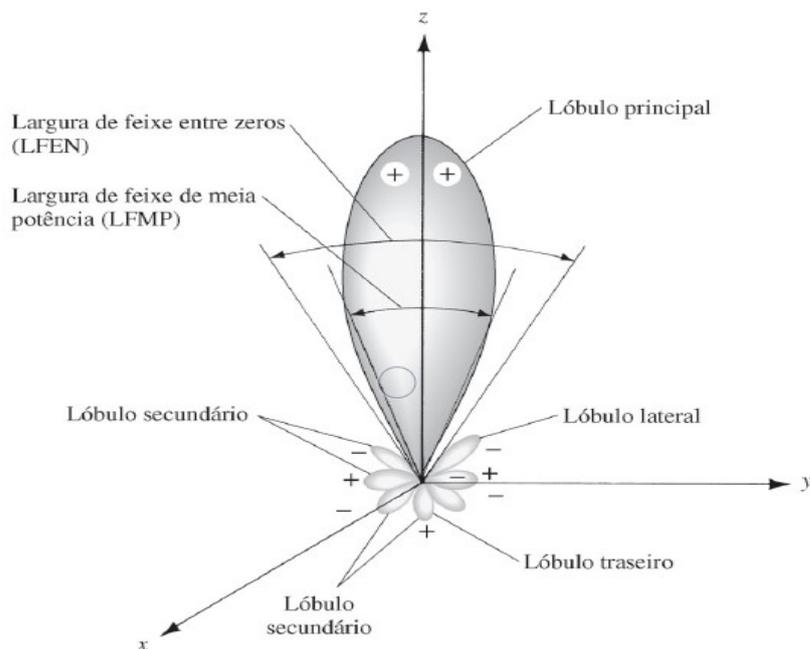
### 2.2.1 Diagrama de Radiação

Segundo BALANIS (2008a), o diagrama de radiação de uma antena é definido como uma função matemática ou representação das propriedades de radiação da antena em função das coordenadas espaciais. As normas da ANATEL definem o diagrama de radiação como sendo um diagrama representando a densidade de potência radiada pela antena, em um dado plano, a uma distância constante da antena, em função de um ângulo medido a partir de uma direção de referência, para uma dada polarização do campo elétrico (ANATEL, 2018).

A Figura 8 ilustra o diagrama de radiação de uma antena, em que é possível observar o lóbulo principal, os lóbulos laterais, secundários e posteriores. O lóbulo principal possui a direção máxima da radiação, enquanto que os lóbulos restantes são considerados secundários. Na maioria das antenas, os lóbulos secundários representam a radiação em

direções indesejadas. Portanto, é interessante a atenuação desses lóbulos.

Figura 8 – Diagrama de radiação



Fonte: BALANIS (2008a, p. 19)

O diagrama de radiação pode ser isotrópico, direcional ou omnidirecional dependendo da especificidade da antena. Os radiadores isotrópicos são hipotéticos e emitem radiação para todas as direções, sem perdas. Radiadores direcionais têm a propriedade de radiar ou receber ondas eletromagnéticas de forma mais eficiente em determinadas direções e os radiadores omnidirecionais possuem um padrão de radiação não direcional em um determinado plano, sendo, no entanto, direcional no respectivo plano ortogonal (BALANIS, 2008a).

### 2.2.2 Regiões de Campo Radiado

O espaço circundante de uma antena é subdividido em três regiões: região reativa de campo próximo, região de radiação do campo próximo e região de campo distante.

A região reativa de campo próximo está localizada ao redor da antena e o campo reativo é mais intenso do que o campo radiado. A região de fronteira é determinada por  $R < 0,62\sqrt{\frac{d^3}{\lambda}}$  da superfície da antena, onde  $\lambda$  é o comprimento de onda e  $d$  é a maior dimensão da antena.

A região de radiação de campo próximo, ou região de Fresnel, como também é conhecida, apresenta os campos radiados mais intensos do que os reativos. Esta região pode não existir se a maior dimensão da antena ( $d$ ) não for muito maior que o comprimento de

onda de operação. A fronteira interna está localizada a uma distância  $R \geq 0,62\sqrt{\frac{d^3}{\lambda}}$  da antena, enquanto que a fronteira externa está localizada a uma distância  $R < 2\frac{d^2}{\lambda}$ .

A região do campo distante, ou região de Fraunhofer, ocorre para distâncias maiores que  $R \geq 2\frac{d^2}{\lambda}$  e, nesta região, a orientação espacial do campo não depende da distância à antena. Essa é a região de maior interesse do ponto de vista da radiação.

### 2.2.3 Densidade de Potência Radiada

As antenas são usadas para transmitir informações através da propagação de ondas eletromagnéticas. Para que a onda eletromagnética alcance a distância determinada torna-se necessário que ela possua uma potência adequada. A grandeza relacionada com essa potência é o vetor de Poynting ( $\vec{\mathcal{W}}$ ), e é definido como o produto vetorial da intensidade de campo elétrico instantâneo ( $\vec{\mathcal{E}}$ ) com o campo magnético instantâneo ( $\vec{\mathcal{H}}$ ), conforme equação 2.1:

$$\vec{\mathcal{W}} = \vec{\mathcal{E}} \times \vec{\mathcal{H}} \quad (W/m^2). \quad (2.1)$$

Para calcular a potência total, basta integrar a componente normal do vetor de Poynting ao longo de uma superfície fechada ( $S$ ) tomada em volta da antena. A potência total é dada pela equação 2.2:

$$\mathcal{P} = \oiint_S \vec{\mathcal{W}} \cdot \hat{n} da \quad (W). \quad (2.2)$$

Como os campos sofrem variações temporais senoidais, é interessante conhecer as densidades médias de potência radiada. Segundo BALANIS (2008a), na região de campo distante, a densidade de potência associada aos campos eletromagnéticos de uma antena é predominantemente real. Portanto, essa densidade é denominada apenas por densidade de radiação ( $W_{rad}$ ). Com isso, tem-se agora a potência radiada, que pode ser escrita como,

$$P_{rad} = \oiint_S \overrightarrow{W_{rad}} \cdot \hat{n} da \quad (W). \quad (2.3)$$

### 2.2.4 Diretividade e Ganho

Um parâmetro fundamental de uma antena é a diretividade ( $D$ ), que é definida como a razão entre a intensidade de radiação ( $U$ ) em uma dada direção e a intensidade de

radiação média ( $U_o$ ), conforme equação 2.4. A intensidade de radiação é um parâmetro relativo ao campo distante e representa a potência radiada por unidade de ângulo sólido.

$$D = \frac{U}{U_o} = \frac{4\pi U}{P_{rad}}. \quad (2.4)$$

Quando não é explicitada a direção, tem-se como base a direção máxima de radiação, então a equação 2.4 torna-se a equação 2.5.

$$D_{max} = \frac{U_{max}}{U_o} = \frac{4\pi U_{max}}{P_{rad}}, \quad (2.5)$$

em que  $D$  é a diretividade (adimensional),  $U$  é a intensidade de radiação (W/unidade de ângulo sólido),  $U_{max}$  é a máxima intensidade de radiação (W/unidade de ângulo sólido) e  $U_o$  é a intensidade de radiação de uma fonte isotrópica (W/unidade de ângulo sólido).

O Ganho é outro parâmetro necessário ao se projetar uma antena, está diretamente relacionado com a diretividade e a eficiência da antena. É definido como a razão entre a intensidade de radiação em uma dada direção e a que teria, se a potência entregue à antena ( $P_{in}$ ) fosse radiada de forma isotrópica,

$$G = 4\pi \frac{U}{P_{in}}. \quad (2.6)$$

### 2.2.5 Polarização

A polarização de onda radiada pode ser definida como a propriedade de uma onda eletromagnética que descreve a direção e a amplitude, variantes no tempo, do vetor de campo elétrico (BALANIS, 2008a). A polarização da onda radiada é a polarização da antena. Portanto, a polarização das ondas radiadas por uma antena varia com o ângulo em torno da antena. Caso não seja especificado nenhum ângulo, a direção de polarização acontece na direção de máxima radiação. Com isso, a direção de polarização do lóbulo principal pode ser totalmente diferente da direção dos lóbulos secundários (STUTZMAN L. W.; THIELE, 2016).

## 2.3 Antenas de Abertura

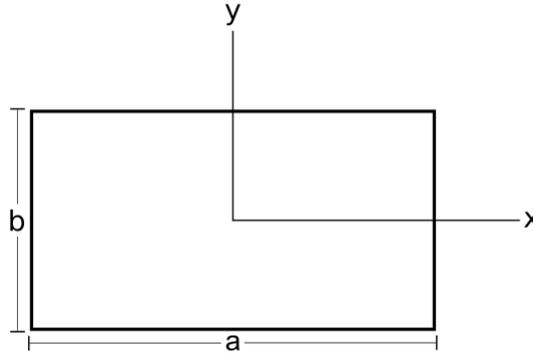
No início do capítulo foi apresentada uma breve exposição sobre as antenas de uma forma geral. Nesta seção, descrevem-se com mais detalhes as características das antenas de abertura, as quais, devido a sua forma geométrica mais sofisticada e a frequência de operação mais elevada, são as antenas usualmente embarcadas em satélites geoestacionários, configurando-se, portanto, como a escolha natural do tipo de antena a ser estudado neste trabalho. Todas as equações utilizadas nesta seção foram baseadas no livro de BALANIS (2008b).

As antenas de abertura funcionam de forma análoga ao funcionamento do olho humano. Ambos operam "coletando" ondas pela abertura, porém a pupila é uma abertura para ondas eletromagnéticas de frequências ópticas, enquanto as antenas de abertura são comuns em frequências designadas *Ultra High Frequency* (UHF) e superiores a essa faixa (STUTZMAN L. W.; THIELE, 2016).

As formas geométricas ilustradas nas Figuras 9 e 10, são as mais comuns para a abertura física de uma antena de abertura. Para uma abertura retangular, de acordo com a Figura 9, com uma distribuição de amplitude e fase uniforme para o campo na abertura,  $E_a$ , em que o módulo desse campo sobre a abertura é a constante  $E_o$  na direção de  $y$  e confinado a uma região com dimensões de  $a$  e  $b$ , é dado por:

$$E_a = \hat{\mathbf{a}}_y E_o \quad -\frac{a}{2} \leq x \leq \frac{a}{2}, \quad -\frac{b}{2} \leq y \leq \frac{b}{2}. \quad (2.7)$$

Figura 9 – Abertura retangular



Fonte: Autor

O problema de radiação para uma abertura retangular com distribuição de amplitude e fase uniforme é um tema canônico na área de antenas e é determinado pelo método da abertura, em que o campo radiado é obtido pela integração das correntes equivalentes na abertura (BALANIS, 2008b). Com isso, as componentes  $\theta$  e  $\phi$  do campo elétrico na região de campo distante em coordenadas esféricas é dado por:

$$E_\theta = j \frac{abkE_0e^{-jkr}}{2\pi r} \left[ \text{sen}\phi \left( \frac{\text{sen}X}{X} \right) \left( \frac{\text{sen}Y}{Y} \right) \right], \quad (2.8a)$$

$$E_\phi = j \frac{abkE_0e^{-jkr}}{2\pi r} \left[ \text{cos}\phi \text{cos}\theta \left( \frac{\text{sen}X}{X} \right) \left( \frac{\text{sen}Y}{Y} \right) \right]. \quad (2.8b)$$

Sendo:

$$X = \frac{ka}{2} \text{sen}\theta \text{cos}\phi, \quad (2.9a)$$

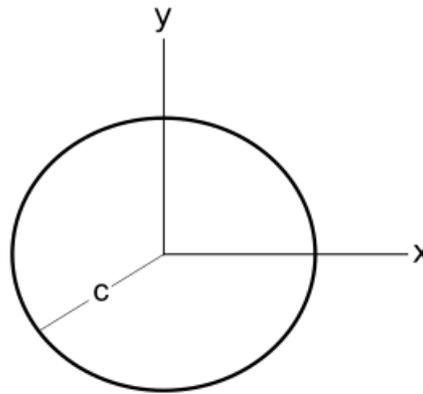
$$Y = \frac{kb}{2} \text{sen}\theta \text{sen}\phi. \quad (2.9b)$$

Nas equações 2.8a e 2.8b, o termo  $\frac{e^{-jkr}}{r}$  é conhecido como o operador de propagação, e  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  é a constante de propagação. Os campos magnéticos radiados podem ser obtidos pelas relações de onda transversais eletromagnéticas (TEM).

A mesma metodologia utilizada para uma abertura retangular é usada para determinar o campo radiado por uma abertura circular de raio  $\rho \leq c$ , como se vê na Figura 10, com distribuição uniforme de amplitude e fase na abertura, conforme descrito na equação:

$$E_a = \hat{\mathbf{a}}_y E_0 \quad \rho \leq c. \quad (2.10)$$

Figura 10 – Abertura circular



Fonte: Autor

Assim, a partir da integração das correntes equivalentes na abertura, BALANIS (2008b), as componentes  $\theta$  e  $\phi$  do campo radiado pela abertura é dado por:

$$E_\theta = j \frac{kc^2 E_0 e^{-jkr}}{r} \left[ \text{sen}\phi \left( \frac{J_1(kc \text{sen}\theta)}{kc \text{sen}\theta} \right) \right], \quad (2.11a)$$

$$E_\phi = j \frac{kc^2 E_0 e^{-jkr}}{r} \left[ \text{cos}\theta \text{cos}\phi \left( \frac{J_1(kc \text{sen}\theta)}{kc \text{sen}\theta} \right) \right], \quad (2.11b)$$

em que  $J_1$  é a função de Bessel de primeira espécie e ordem um. Os campos magnéticos radiados podem ser obtidos pelas relações de onda TEM.

## 2.4 Transformada de Fourier na Teoria de Antenas de Abertura

Na seção anterior foi apresentada uma técnica de análise de antenas de abertura no domínio espacial, no entanto, à medida que o campo na abertura apresenta uma distribuição não uniforme para a amplitude e fase, a integral das correntes equivalentes torna-se um problema de difícil solução. Contudo, considerável simplificação pode ser obtida com a transferência do problema para o domínio espectral (BALANIS, 2008b).

### 2.4.1 Transformada de Fourier - Domínio Espectral

Em sinais e sistemas, a transformada de Fourier é utilizada para transformar funções que estão no domínio do tempo  $x(t)$  para o domínio na frequência  $X(f)$ , e a transformada inversa é aplicada, quando se quer transformar funções que estão no domínio da frequência para o domínio do tempo. Neste trabalho, a transformada direta de Fourier foi utilizada para transformar funções bi-dimensionais, que estão no domínio espacial  $f(x, y)$ , em funções bi-dimensionais no domínio espectral  $\mathfrak{F}(w_1, w_2)$ .

A definição da transformada direta de Fourier em duas dimensões é dada por:

$$f(x, y) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \mathfrak{F}(w_1, w_2) e^{-j(w_1x + w_2y)} dw_1 dw_2, \quad (2.12)$$

com sua inversa dada por:

$$\mathfrak{F}(w_1, w_2) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y) e^{+j(w_1x + w_2y)} dx dy. \quad (2.13)$$

Dentre as propriedades da transformada de Fourier, o teorema de Parseval é uma identidade muito útil, escrita como:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) g^*(x, y) dx dy = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \mathfrak{F}(w_1, w_2) \mathfrak{G}^*(w_1, w_2) dw_1 dw_2, \quad (2.14)$$

em que o \* indica o complexo conjugado. A interpretação desse teorema é que a energia total do sinal contido no domínio espacial  $f(x, y)$ , é igual ao total da energia obtido pela transformada de Fourier  $\mathfrak{F}(w_1, w_2)$ , obedecendo ao princípio da conservação da energia.

### 2.4.2 Cálculo Assintótico do Campo Radiado

Na seção 2.3, a Equação 2.8 representa o campo elétrico radiado a partir de uma abertura retangular, obtida pelo método da abertura que é uma técnica no domínio espacial. Nesta seção, utiliza-se a teoria da transformada de Fourier (técnica no domínio espectral) para fazer esse mesmo cálculo.

O campo  $\mathbf{E}(x, y, z)$  radiado por uma antena com abertura retangular, conforme ilustrado na 9, aplicando-se a técnica da transformada de Fourier, é dado conforme a equação 2.15:

$$\mathbf{E}(x, y, z) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \mathbf{f}(k_x, k_y) e^{-j\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}} dk_x dk_y \quad (2.15)$$

em que a função  $f(k_x, k_y)$  é a amplitude vetorial da onda, e  $k_x$  e  $k_y$  são as frequências espectrais que se estendem ao longo de todo o espectro ( $-\infty \leq k_x, k_y \leq \infty$ ). O campo  $\mathbf{E}(x, y, z)$  radiado pela abertura pode ser escrito como uma superposição de ondas planas

(todas da mesma frequência, com amplitudes diferentes e viajando em diferentes direções). O objetivo de uma expansão em ondas planas é a determinação das amplitudes desconhecidas  $f(k_x, k_y)$  e da direção de propagação das ondas planas.

Para a maioria das antenas práticas, a distribuição de campo na abertura é tal que o cálculo exato de 2.15 na forma analítica não é possível. No entanto, se as observações forem feitas na região de campo distante (grandes valores de  $kr$ ), o cálculo da integral torna-se menos complexo e pode ser calculado assintoticamente usando-se o método da Fase Estacionária, demonstrado em BALANIS (2008b, Apêndice VIII), resultando em:

$$\mathbf{E}(r, \theta, \phi) \approx j \frac{ke^{-jkr}}{2\pi r} [\hat{\mathbf{a}}_\theta (f_x \cos\phi + f_y \sin\phi) + \hat{\mathbf{a}}_\phi \cos\theta (-f_x \sin\phi + f_y \cos\phi)], \quad (2.16)$$

onde  $f_x$  é igual a:

$$f_x(k_x = k_1, k_y = k_2) = \int_{-b/2}^{+b/2} \int_{-a/2}^{+a/2} E_{xa}(x', y', z' = 0) \times e^{jk(x' \sin\theta \cos\phi + y' \sin\theta \sin\phi)} dx' dy', \quad (2.17)$$

e  $f_y$  é igual a:

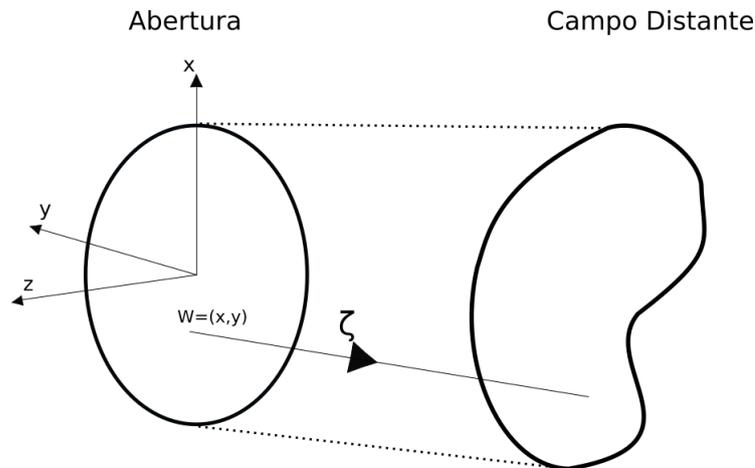
$$f_y(k_x = k_1, k_y = k_2) = \int_{-b/2}^{+b/2} \int_{-a/2}^{+a/2} E_{ya}(x', y', z' = 0) \times e^{jk(x' \sin\theta \cos\phi + y' \sin\theta \sin\phi)} dx' dy'. \quad (2.18)$$

Considerando-se a simplificação da técnica espectral para determinar o problema de radiação de antenas de abertura, bem como as propriedades da Transformada de Fourier, este trabalho propõe, no Capítulo 3, uma metodologia baseada no uso da transformada de Fourier inversa para solução do problema de síntese, ou seja, para determinar o campo da abertura a partir de um campo radiado especificado.

## 2.5 O Problema de Síntese do Campo na Abertura de uma Antena Offset

Em 1993, Westcott propôs um método para a resolução do problema de síntese do campo na abertura de uma antena refletora e fez algumas comparações desse método com alguns existentes na literatura da época. Em seu primeiro artigo, publicado naquele ano, intitulado *Smooth aperture distribution synthesis for shaped beam reflector antennas* (WESTCOTT; ZAPOROZHETS; SEARLE, 1993), o problema de síntese foi solucionado em duas etapas. Na primeira, foi obtida uma solução por meio dos princípios da Óptica Geométrica, conforme Figura 11, em que  $\zeta$  representa a direção de raio no campo distante. Essa solução serviu como variável de entrada para a segunda etapa, onde foi feita a otimização dos resultados já encontrados, utilizando-se conceitos de Física Óptica.

Figura 11 – Análise apresentada por Westcott



Fonte: Adaptado de Westcott, Zaporozhets e Searle (1993)

Em seu segundo artigo *Fast synthesis of aperture distributions for contoured beam reflector antennas* (WESTCOTT; ZAPOROZHETS, 1993), a primeira etapa de seu trabalho anterior permaneceu, ou seja, o problema de síntese foi inicialmente resolvido, aplicando-se os princípios da Óptica Geométrica. Entretanto, na segunda etapa, foram feitas algumas comparações com outros métodos de otimização e foi observado que o método que aplicava o gradiente na função para otimizar campos de abertura de antenas refletoras se mostrou eficiente quando comparado com outras abordagens.

Diferentemente de Westcott, Sorensen et al. (1991) propôs uma solução ao problema de síntese com base nos polinômios de Zernike, para representação do campo na abertura, e a transformada de Fourier desses polinômios, para a construção do campo distante. Mais detalhes desse trabalho é apresentado na seção 3.3 do capítulo de metodologia. Os resultados teóricos desse trabalho foram comparados com dois resultados práticos, sendo o primeiro obtido a partir de um sistema constituído por um refletor modelado e um único alimentador, enquanto que o segundo sistema consistia de um refletor parabólico alimentado por um conjunto de alimentadores.

## 3 Metodologia

Como o objetivo do trabalho é encontrar o campo na abertura de uma antena offset a partir de uma determinada cobertura, propõe-se uma metodologia em que o campo distante é representado através da transformada de Fourier e, em seguida, o campo na abertura é obtido com os polinômios de Zernike. Neste capítulo, detalham-se a metodologia utilizada e a teoria matemática que serviu de base para tal implementação.

### 3.1 Polinômios de Zernike

Frits Zernike nasceu em Amsterdam, em 1888. Em 1953, ganhou o Prêmio Nobel de Física por sua invenção do microscópio de contraste de fase (NOBELPRIZE.ORG, 2021). Em sua jornada acadêmica, ele também desenvolveu um sistema de funções matemáticas que definem superfícies geométricas para representar as alterações de forma, ou aberrações de frentes de ondas no olho humano (JANKOV et al., 2002). Essas funções são uma sequência de polinômios contínuos e ortogonais sobre um círculo. Posteriormente, essa sequência ficou conhecida como polinômios de Zernike, em homenagem ao seu criador. Analisando-se em projetos de antenas, no procedimento de síntese, a abertura é representada por um círculo ou elipse em que o campo é expandido em polinômios de Zernike (SORENSEN et al., 1991).

Para análise dos polinômios de Zernike, foi utilizada a demonstração matemática de Lakshminarayanan e Fleck (2011). Considere-se, nesse caso, uma função que pode descrever uma frente de onda arbitrária em coordenadas polares, sendo representada por:

$$W(r, \theta) = \sum_{n,m} C_n^m Z_n^m(r, \theta), \quad (3.1)$$

em que  $r$  é o raio do círculo unitário ( $0 \leq r \leq 1$ ),  $Z_n^m$  representa os polinômios de Zernike e o seu subscrito é chamado de ordem da função ou polinômio ( $n$ ), enquanto o sobrescrito que varia de  $m = -n$  até  $+n$ , com  $(n - m)$  par, é denominado grau. Os coeficientes de Zernike,  $C_n^m$ , são definidos pela equação:

$$C_n^m = \iint_{\text{círculo}} W(r, \theta) Z_n^m(r, \theta) r \, dr \, d\theta. \quad (3.2)$$

Os polinômios de Zernike podem ser expressos por:

$$Z_n^m(r, \theta) = R_n^m(r) \cos(m\theta) \text{ para } m \geq 0, \quad (3.3a)$$

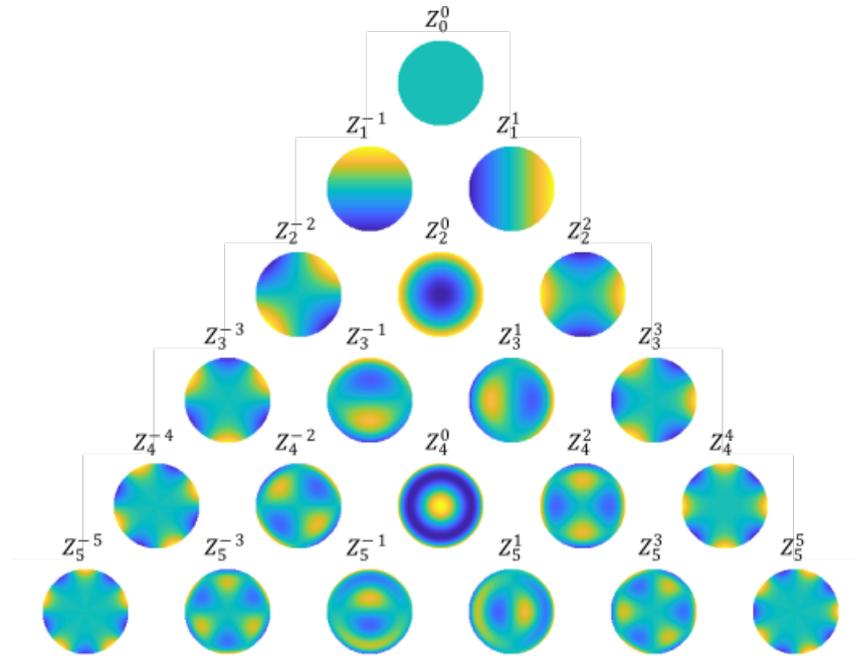
$$Z_n^{-m}(r, \theta) = R_n^m(r) \sin(m\theta) \text{ para } m < 0. \quad (3.3b)$$

A função radial,  $R_n^m(r)$ , é definida por:

$$R_n^m(r) = \sum_{k=0}^{\frac{n-m}{2}} \frac{(-1)^k (n-k)!}{k! \left(\frac{n+m}{2} - k\right)! \left(\frac{n-m}{2} - k\right)!} r^{n-2k}. \quad (3.4)$$

A partir das equações 3.3 e 3.4 foi obtida a Figura 12 para a representação dos primeiros 21 polinômios de Zernike. Alguns desses polinômios na óptica são bem significativos e possuem alguns nomes clássicos, como exemplo,  $Z_2^{-2}$  é conhecido como astigmatismo e  $Z_2^0$  como desfoque. Posteriormente, será visto que um conjunto de 45 polinômios serão usados para representar o campo na abertura; neste trabalho, as cores mais escuras (azul escuro) caracterizam campos elétricos de menor amplitude e as cores mais claras (amarelo claro) caracterizam campos elétricos mais elevados.

Figura 12 – Representação dos primeiros 21 polinômios de Zernike



Fonte: Autor

O fator

$$N_n^m = \sqrt{\frac{(2 - \delta_{m0})(n+1)}{\pi}}, \quad (3.5)$$

em que  $\delta_{m0}$  é o delta de Kronecker ( $\delta_{m0} = 0$  para  $m \neq 0$ ) é geralmente usado como uma constante de normalização para as funções polinomiais de Zernike, denominado fator de

normalização e é escolhido de tal forma que,

$$\int_0^1 \int_0^{2\pi} r Z_n^m(r, \theta)^2 d\theta dr = 1. \quad (3.6)$$

Com isso, normalizando a equação 3.1, tem-se:

$$W(r, \theta) = \sum_{n,m} C_n^m Z_n^m(r, \theta) N_n^m. \quad (3.7)$$

Geralmente a constante,  $N_n^m$ , utilizada para normalização é omitida nas demonstrações matemáticas para fins de simplificação do cálculo.

## 3.2 Transformada de Fourier dos Polinômios de Zernike

Em Dai (2006a), é apresentada a transformada de Fourier dos polinômios de Zernike, que é dada pela Equação 3.8:

$$U_i(k, \phi) = \int \int Z_i(r, \theta) e^{-j2\pi k r \cos(\theta - \phi)} d^2r. \quad (3.8)$$

A integral da Equação 3.8 tem solução analítica e é dada pela equação 3.9:

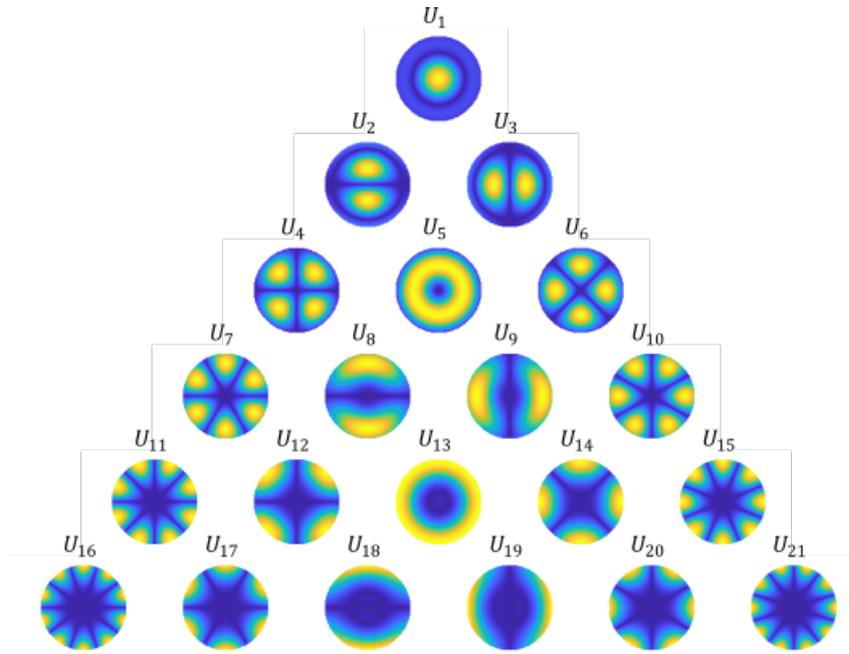
$$U_i(k, \phi) = (-1)^{\frac{n}{2} + |m|} \sqrt{n+1} \frac{J_{n+1}(2\pi k)}{k} \Theta^m(\phi), \quad (3.9)$$

em que o subscrito  $i$  representa o  $i$ -ésimo termo da série de polinômios de Zernike,  $k$  e  $\phi$  são as coordenadas polares da região de cobertura,  $r$  e  $\theta$  são as coordenadas polares da região da abertura,  $J_n$  é a função de Bessel de primeira espécie e ordem  $n$ , e por fim,  $\Theta^m(\phi)$  é definido como

$$\Theta^m(\phi) = \begin{cases} \sqrt{2} \cos(m\phi), & \text{para } m > 0 \\ 1, & \text{para } m = 0 \\ -\sqrt{2} \sin(m\phi), & \text{para } m < 0 \end{cases} \quad (3.10)$$

A Figura 13 representa a transformada de Fourier dos primeiros 21 polinômios de Zernike, conforme ilustrados na Figura 12. De forma similar, nesta figura, as cores são usadas para representar as amplitudes dos campos elétricos, e, a partir da transformada Fourier do conjunto de 45 polinômios de Zernike, será possível reconstruir o campo distante, como será visto na próxima seção.

Figura 13 – Representação das primeiras 21 transformadas de Fourier dos polinômios de Zernike



Fonte: Autor

### 3.3 Síntese do Campo na Abertura

De acordo com Sorensen et al. (1991), o campo na abertura de uma antena offset será representado por um conjunto de polinômios de Zernike. Assim, a região de cobertura,  $a(k, \phi)$ , pode ser obtida a partir dos coeficientes de Zernike,  $c_i$ , e a transformada de Fourier dos polinômios de Zernike,  $U_i(k, \phi)$ , conforme a seguinte equação:

$$a(k, \phi) = \sum_{i=0}^{\infty} c_i U_i(k, \phi). \quad (3.11)$$

Os coeficientes,  $c_i$ , da Equação 3.11 podem ser obtidos, segundo Dai (2006b), fazendo-se a inversão dessa equação, ou seja,

$$c_i = U_i(k, \phi)^{-1} a(k, \phi), \quad (3.12)$$

que é a solução proposta para o problema de síntese do campo na abertura.

A reconstrução do campo na abertura é feita aplicando os coeficientes  $c_i$  obtidos através da Equação 3.12 na Equação 3.1.

Segundo a literatura, para a reconstrução de frentes de onda, utilizando até sexta ordem dos polinômios de Zernike, o erro é de aproximadamente de 5,55% entre a imagem original e a reconstruída; até a oitava ordem, o erro é de 2,83%, e até a decima, é de 2,82% (DAI, 2006a). Portanto, como a diferença do erro, a partir da oitava ordem, é pequena

em relação às ordens superiores, e para um melhor desempenho computacional, foram utilizadas até a oitava ordem na reconstrução das frentes de onda do campo na abertura.

### 3.4 Teorema de Malus

O Teorema de Malus deve ser obedecido, sob os princípios da Óptica Geométrica, para que seja possível a síntese de um sistema duplo-refletor off-set. Esse sistema é obtido a partir da solução de uma equação diferencial em que o campo na abertura deve ser uma função suave, ou seja, as derivadas de primeira ordem da função de fase, em relação às coordenadas  $x$  e  $y$  da abertura, devem oscilar dentro de um certo limite (BRICKELL; WESTCOTT, 1978). Matematicamente, tem-se que,

$$\sqrt{\left(\frac{\partial l}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial l}{\partial y}\right)^2} \leq 1, \quad (3.13)$$

em que  $l(x, y)$  é a fase do campo da abertura.

Sabendo que a fase deve ser uma função contínua e suave, e também com o objetivo de evitar os problemas numéricos no algoritmo implementado, é proposta uma solução alternativa para o cálculo de suas derivadas parciais, que é apresentado a seguir.

O campo na abertura, encontrado a partir da Equação 3.1, pode ser reescrito de forma expandida, conforme Equação 3.14, na qual os coeficientes de Zernike são complexos, ou seja,  $c_i = a_i + jb_i$ .

$$W(x, y) = (a_1 + jb_1)Z_1 + (a_2 + jb_2)Z_2 + \dots + (a_n + jb_n)Z_n, \quad (3.14a)$$

$$W(x, y) = (a_1Z_1 + a_2Z_2 + \dots + a_nZ_n) + (jb_1Z_1 + jb_2Z_2 + \dots + jb_nZ_n). \quad (3.14b)$$

O módulo do campo da abertura é dado pela Equação 3.15 e a fase pela Equação 3.16

$$|W(x, y)| = \sqrt{(a_1Z_1 + a_2Z_2 + \dots + a_nZ_n)^2 + (b_1Z_1 + b_2Z_2 + \dots + b_nZ_n)^2}, \quad (3.15)$$

$$l(x, y) = \angle W(x, y) = \arctg \left( \frac{b_1Z_1 + b_2Z_2 + \dots + b_nZ_n}{a_1Z_1 + a_2Z_2 + \dots + a_nZ_n} \right). \quad (3.16)$$

Para verificar se o campo na abertura sintetizado atende ao teorema de Malus, a fase na abertura deve ser derivada em relação a  $x$  e  $y$ . Neste trabalho, utilizam-se as seguintes notações simplificadas para denotar as derivadas parciais da função fase na abertura:

$$l_x = \frac{\partial l(x, y)}{\partial x}, \quad (3.17)$$

$$l_y = \frac{\partial l(x, y)}{\partial y}. \quad (3.18)$$

Além disso, adotam-se as seguintes definições de nomenclatura, a fim de simplificar a formulação para verificação do teorema de Malus:

$$N = b_1 Z_1 + b_2 Z_2 + \dots + b_n Z_n, \quad (3.19a)$$

$$D = a_1 Z_1 + a_2 Z_2 + \dots + a_n Z_n. \quad (3.19b)$$

As derivadas parciais das Equações em 3.19, em relação a  $x$  e  $y$ , são dadas por:

$$N_x = \frac{\partial N}{\partial x} = b_1 \frac{\partial Z_1}{\partial x} + b_2 \frac{\partial Z_2}{\partial x} + \dots + b_n \frac{\partial Z_n}{\partial x}, \quad (3.20a)$$

$$N_y = \frac{\partial N}{\partial y} = b_1 \frac{\partial Z_1}{\partial y} + b_2 \frac{\partial Z_2}{\partial y} + \dots + b_n \frac{\partial Z_n}{\partial y}, \quad (3.20b)$$

$$D_x = \frac{\partial D}{\partial x} = a_1 \frac{\partial Z_1}{\partial x} + a_2 \frac{\partial Z_2}{\partial x} + \dots + a_n \frac{\partial Z_n}{\partial x}, \quad (3.20c)$$

$$D_y = \frac{\partial D}{\partial y} = a_1 \frac{\partial Z_1}{\partial y} + a_2 \frac{\partial Z_2}{\partial y} + \dots + a_n \frac{\partial Z_n}{\partial y}, \quad (3.20d)$$

em que o termo  $\frac{\partial Z_i}{\partial x}$  e  $\frac{\partial Z_i}{\partial y}$  são as derivadas parciais do polinômio de Zernike  $i$  em relação a  $x$  e  $y$ , respectivamente.

Derivando a fase em relação  $x$ , tem-se que:

$$l_x = \frac{1}{1 + \left(\frac{N}{D}\right)^2} \left( \frac{N_x D - D_x N}{D^2} \right) = \frac{N_x D - D_x N}{D^2 + N^2} = \frac{N_x D - D_x N}{|W(x, y)|^2}, \quad (3.21)$$

em que, o termo  $D^2 + N^2$  é igual ao quadrado do módulo do campo na abertura encontrado em 3.15. De forma análoga, a equação 3.21, a derivada da fase em relação a  $y$  é igual a

$$l_y = \frac{N_y D - D_y N}{|W(x, y)|^2}. \quad (3.22)$$

Uma vez que as derivadas dos polinômios de Zernike sejam avaliadas numericamente, as Equações 3.21 e 3.22 são expressões semi-analíticas para as derivadas da função fase do campo na abertura em relação a  $x$  e  $y$  para evitar os problemas de descontinuidade da fase.

## 4 Estudos de Casos

Para validar a metodologia demonstrada no capítulo anterior, foram feitos dois estudos de caso. O primeiro estudo de caso foi feito a partir da cobertura definida no artigo *Synthesis of the aperture field for a contoured beam* (SORENSEN et al., 1991). Para o segundo estudo de caso foi utilizada a cobertura do satélite Star One C3, na banda Ku de descida, disponibilizada pela Embratel, que é a empresa responsável pelo satélite (EMBRATEL, 2021b).

### 4.1 Estudo de Caso 1

O primeiro estudo de caso analisado tem a área de cobertura definida pela equação 4.1, onde  $a = 0.5095$ ,  $b = 0.1698$  e  $\phi$  varia de 0 a  $2\pi$ .

$$k = a + b\cos(3\phi). \quad (4.1)$$

O mapeamento da cobertura é feito no plano UV, em que  $U$  e  $V$  estão relacionados aos ângulos esféricos  $k$  e  $\phi$ , por:

$$U = \text{sen}(k)\cos(\phi), \quad (4.2a)$$

$$V = \text{sen}(k)\text{sen}(\phi). \quad (4.2b)$$

O ângulo  $\phi$  é conhecido como azimute e o  $k$  é o ângulo de elevação, o qual não é superior a 10 graus (SORENSEN et al., 1991). Portanto, pode-se utilizar a aproximação  $\text{sen}(k) \approx k$ , reescrevendo as equações 4.2a e 4.2b,

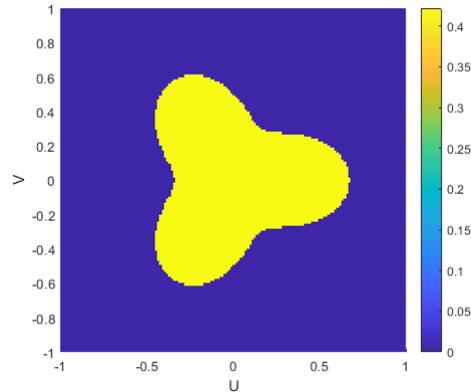
$$U = k\cos(\phi), \quad (4.3a)$$

$$V = k\text{sen}(\phi). \quad (4.3b)$$

Baseado na utilização da equação 4.1, é definido o sistema de coordenadas nas Equações 4.2 e 4.3, para a construção da cobertura,  $a(k, \phi)$ , exibida na Figura 14, em que a região em amarelo tem o valor de campo elétrico constante igual 0,4218 V/m, e a região em azul possui um campo elétrico nulo.

Aplicando-se o método apresentado na seção 3.3, inicialmente encontraram-se os coeficientes  $c_i$  da Equação 3.12, representados na Figura 15. Para tal, foi utilizada a

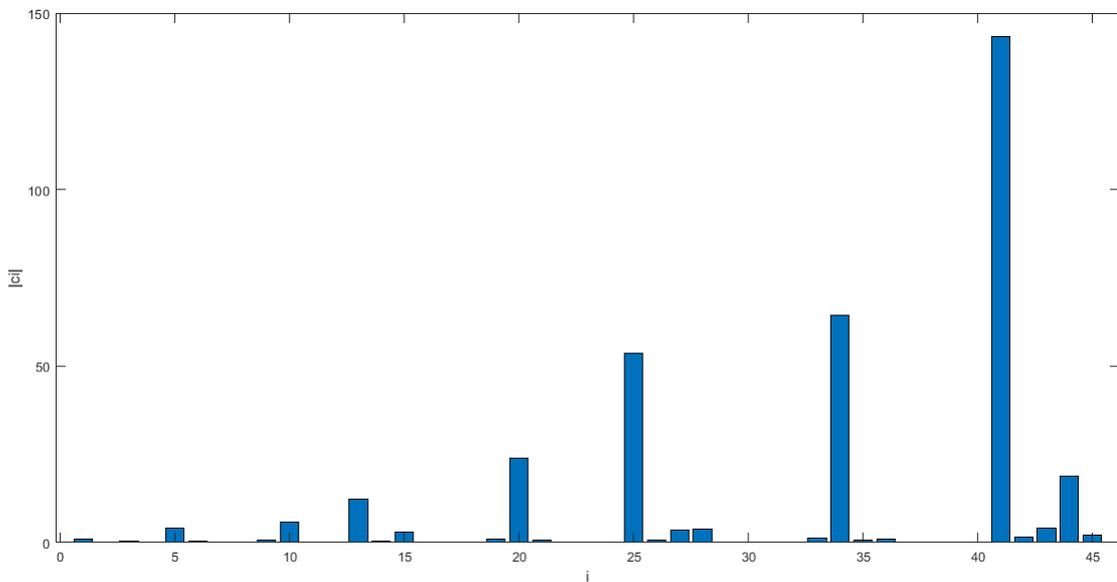
Figura 14 – Especificação da cobertura - Estudo de caso 1



Fonte: Autor

transformada de Fourier,  $U(k, \phi)$ , do conjunto de 45 polinômios de Zernike. Os coeficientes de Zernike que possuem maior contribuição para a construção dos campos na abertura, conforme Figura 15, são os de índice 25, 34 e 41.

Figura 15 – Coeficientes Zernike - Estudo de Caso 1

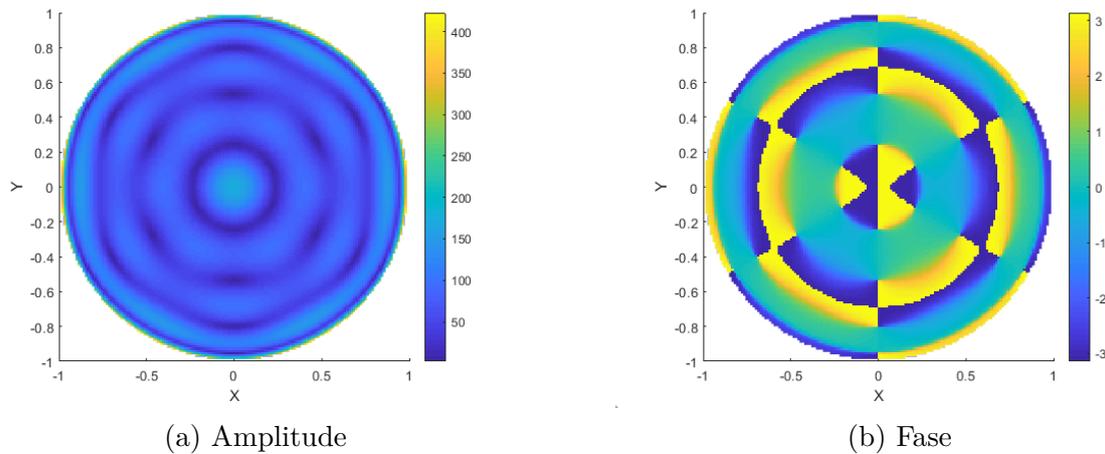


Fonte: Autor

Com os coeficientes Zernike encontrados, foi possível obter o campo ideal na abertura da antena,  $W(r, \theta)$ , utilizando o método apresentado na seção 3.3 e a Equação 3.1. A amplitude e a fase desse campo estão ilustradas na Figura 16.

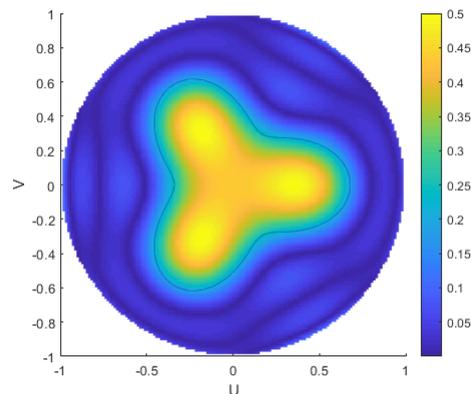
Para encontrar a região de cobertura,  $a(k, \phi)$ , utilizou-se da Equação 3.11. O resultado encontrado é apresentado na Figura 17, que é similar a cobertura especificada na Figura 14, validando, assim, o algoritmo e o método utilizados.

Figura 16 – Campo na abertura - Estudo de Caso 1



Fonte: Autor

Figura 17 – Cobertura reconstruída - Estudo de caso 1

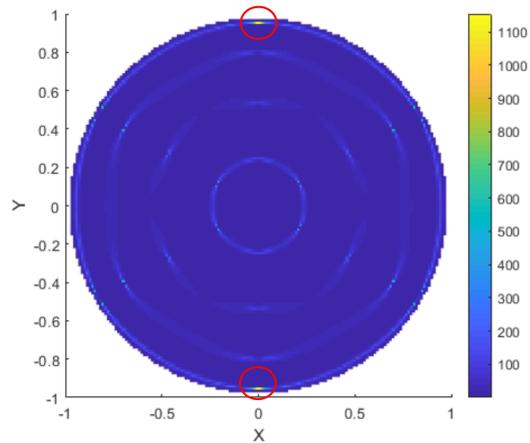


Fonte: Autor

Como demonstrado na seção 3.4, para que uma antena possa ser construída fisicamente, só é possível se o campo na abertura satisfizer o Teorema de Malus. Dessa forma, na Figura 18 é exibido o valor encontrado para o lado esquerdo da inequação 3.13, no qual, alguns pontos foram maiores do que o permitido, indicando que houve descontinuidade naquela determinada região. Com isso, conclui-se que o campo na abertura obtido é ideal, entretanto não satisfaz o Teorema de Malus e, conseqüentemente, não pode ser implementado na prática. Nessa figura, ainda é possível destacar que os maiores picos estão localizados na borda, os dois maiores estão destacados dentro de um círculo vermelho.

Fazendo um paralelo entre os resultados encontrados neste trabalho, na Figura 19 estão os resultados encontrados por Sorensen et al. (1991) para uma abertura ideal, em que foi usada a mesma equação 4.1, porém os valores das constantes usadas foram:

Figura 18 – Resultado teorema de Malus - Estudo de Caso 1

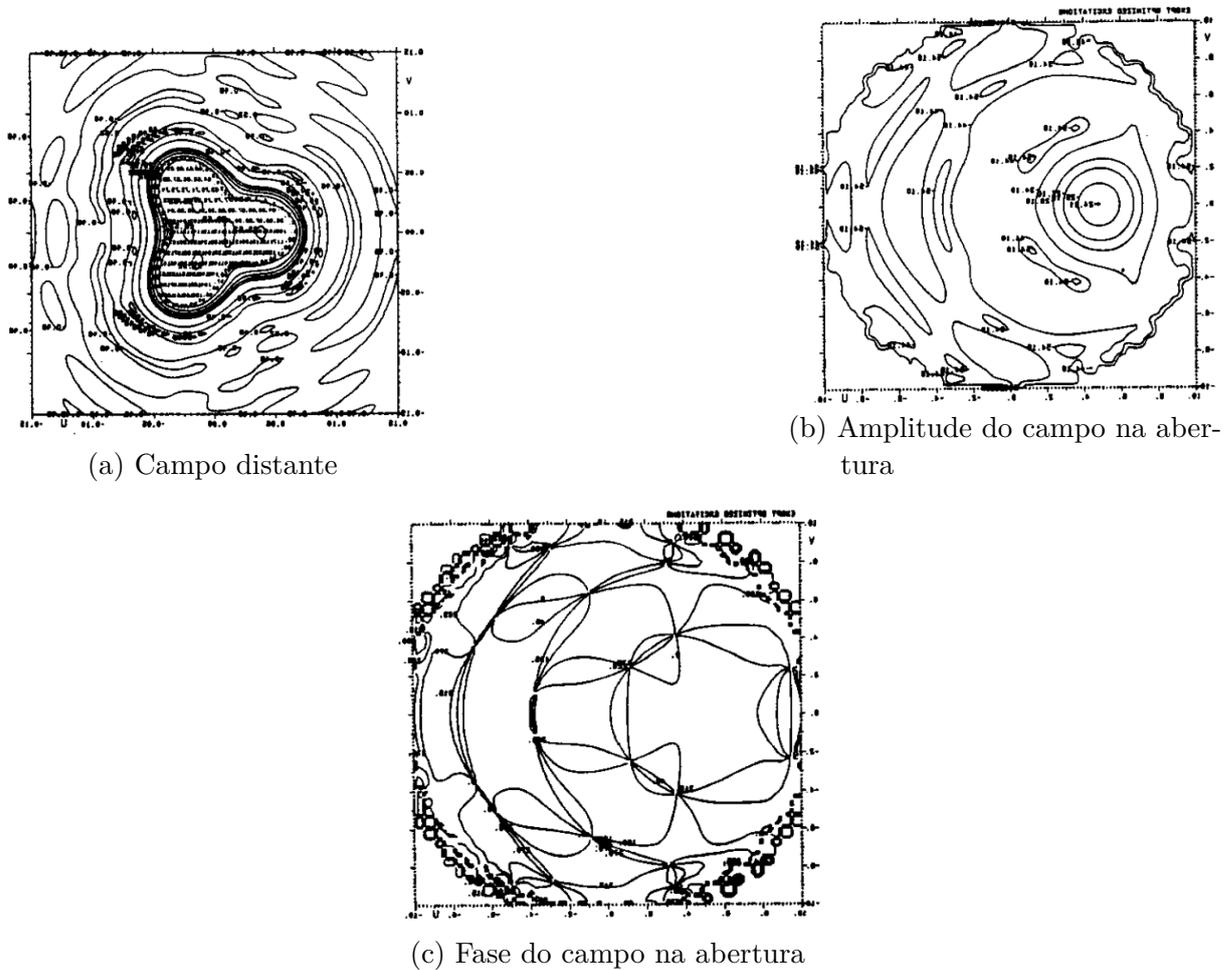


Fonte: Autor

$a = 0.05095$  e  $b = 0.01698$ . É possível observar que o campo distante das Figuras 17 e 19a são similares, pois ambos concentram os maiores valores de campo no centro, entretanto ao ir se aproximando da região de fronteira esse valor cai consideravelmente. A linha traçada na Figura 17 permite uma melhor visualização dessa região de fronteira.

A análise dos resultados para amplitude (Figuras 16a e 19b) e fase (Figuras 16b e 19c) do campo na abertura também é interessante. É possível perceber que ambos os resultados possuem uma borda com comportamento diferente do restante da figura.

Figura 19 – Campo distante e campo na abertura para um sistema ideal



Fonte: Sorensen et al. (1991, p. 337)

## 4.2 Estudo de Caso 2

O segundo estudo de caso foi feito a partir da cobertura do satélite artificial, Star One C3, localizado na posição orbital  $75,0^\circ\text{W}$  e lançado pela empresa francesa Arianespace, em novembro de 2012. Na Figura 20, é mostrada a equipe colocando o C3 no foguete utilizado para o lançamento e, na Figura 21, ele já na órbita da Terra. Atualmente, é o principal satélite da Embratel para distribuição de TV a retransmissoras em todo Brasil. Para mais características do satélite, consultar Anexo B.

Figura 20 – Foto da preparação para o lançamento do Star One C3 para a órbita da Terra



Fonte: EMBRATEL (2021a).

Figura 21 – Foto do Star One C3 na órbita da Terra

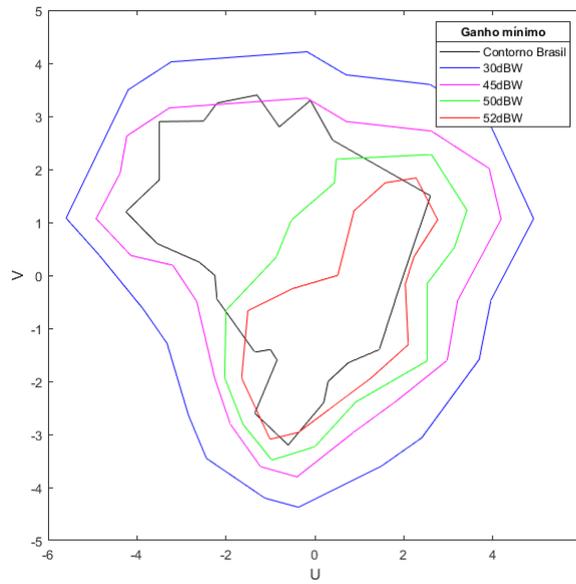


Fonte: EMBRATEL (2021a).

No Anexo C está o ganho de polarização da cobertura disponibilizado pela Embratel e, a partir dele, construiu-se a Figura 22, em que foi acrescentada mais uma região de 30dBW para não gerar tanto impacto na reconstrução da cobertura utilizando-se a transformada de Fourier na fronteira de 45dBW com a área externa.

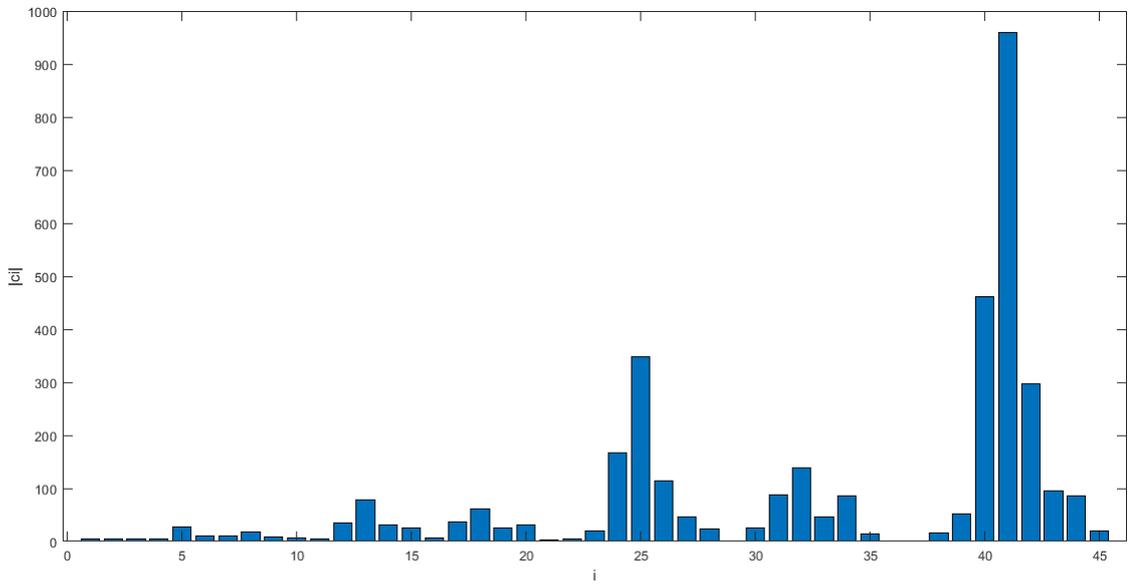
De forma similar a apresentada no Estudo de Caso 1, os coeficientes de Zernike foram encontrados e estão apresentados na Figura 23, em que os coeficientes 25, 40, 41 e 42 são mais significativos.

Figura 22 – Ganho de polarização da cobertura



Fonte: Autor

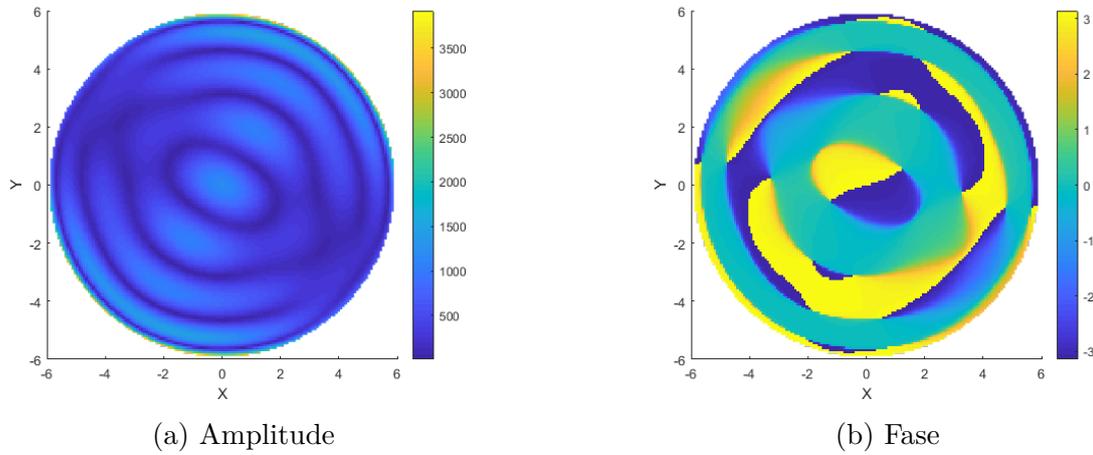
Figura 23 – Coeficientes de Zernike - Estudo de Caso 2



Fonte: Autor

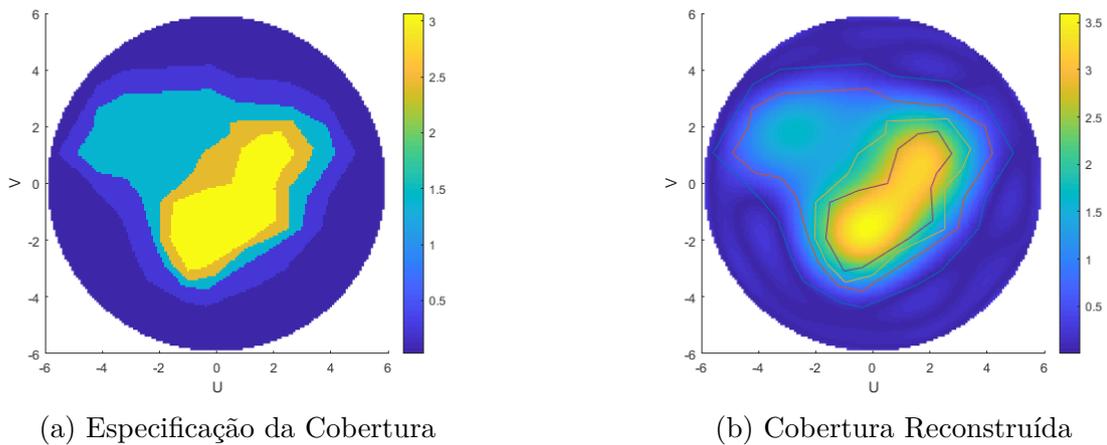
A partir dos coeficientes da Figura 23, foi possível obter o campo ideal na região da abertura, em que a amplitude e a fase desse campo estão ilustradas nas Figuras 24a e 24b, respectivamente. E então, é obtida a reconstrução da cobertura ilustrada na Figura 25b.

Figura 24 – Campo na abertura - Estudo de Caso 2



Fonte: Autor

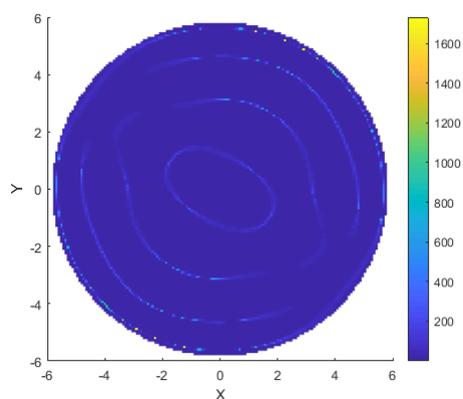
Figura 25 – Cobertura - Estudo de Caso 2



Fonte: Autor

Na Figura 26, é exibido o valor encontrado para o lado esquerdo da inequação 3.13, que é usada para verificar se o campo na abertura, ilustrado na Figura 24, satisfaz o teorema de Malus. Os resultados encontrados foram bem similares ao Estudo de Caso 1, houve alguns picos indicando regiões com descontinuidades, em que os de maior amplitude estavam concentrados na região da borda. Portanto, o campo na abertura encontrado para o estudo de caso 2 também é ideal, pois não satisfaz o teorema de Malus.

Figura 26 – Resultado teorema de Malus - Estudo de Caso 2



Fonte: Autor

Por fim, a quantidade de pontos usados para discretizar os campos também afetou significativamente o tempo de processamento do algoritmo, quanto mais pontos, maior foi o tempo de espera.

# 5 Conclusão

## 5.1 Considerações Finais

Este trabalho apresentou o desenvolvimento de um método para a obtenção do campo ideal na abertura a partir dos polinômios de Zernike. Inicialmente, fez-se uma revisão bibliográfica de conceitos relevantes para o trabalho e da solução para o problema de radiação, em que as fontes são especificadas e os campos radiados por ela são calculados. Posteriormente, apresentou-se na metodologia do trabalho a solução do problema de síntese, no qual os campos radiados são informados e a variável desconhecida é a abertura, que foi obtida com base na utilização dos polinômios de Zernike e a sua transformada de Fourier. Com o intuito de avaliar e validar a metodologia proposta foram feitos dois estudos de caso. No primeiro estudo, a cobertura proposta foi solucionada com os resultados comparados com a literatura. Enquanto que, no segundo estudo de caso, foi especificada a cobertura do território brasileiro por meio do satélite artificial Star One C3.

Contudo, por estar trabalhando com um campo ideal, o resultado encontrado não pode ser aplicado na prática no projeto de uma antena offset. Para que isso seja possível, faz-se necessário implementar um método de otimização, com a finalidade de satisfazer o teorema de Malus. Entretanto, a metodologia utilizada foi validada ao fazer a reconstrução do campo distante a partir do campo na abertura encontrado.

## 5.2 Propostas para Trabalhos Futuros

Com este trabalho mostrou ser possível encontrar o campo ideal na abertura de uma antena. Contudo, são necessários mais estudos para a implementação computacional de um algoritmo para otimizar os coeficientes de Zernike, a fim de atender ao teorema de Malus. A seguir, estão os itens que serão trabalhados e melhorados no desenvolvimento futuro deste trabalho.

- Analisar o número de pontos utilizados na discretização da região de cobertura e na região da abertura.
- Analisar a contribuição dos coeficientes de Zernike na reconstrução da região da abertura.
- Implementar um método de otimização com restrições para incorporar o teorema de Malus na metodologia de obtenção dos coeficientes de Zernike.

## Referências

- ANATEL. *Glossário de Termos da Anatel*. 2018. Disponível em: <<https://www.anatel.gov.br/legislacao/component/fsf/?view=faq&catid=1&faqid=548>>. Acesso em: 9 nov. 2019. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 20.
- ANATEL. *Relação de satélites autorizados a operar no Brasil*. 2021. Disponível em: <<https://sistemas.anatel.gov.br/anexar-api/publico/anexos/download/e0f5f628c2087e94d408b7f20df13e22>>. Acesso em: 2 jun. 2021. Citado na página 14.
- ASSIS, A. R. *Aplicação de óptica geométrica na síntese de antenas duplo-refletoras offset e de lentes dielétricas sem simetria circular*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Minas Gerais, 2020. Citado na página 14.
- BALANIS, C. A. *Teoria de Antenas - Análise e Síntese*. Rio de Janeiro, 2008. v. 1. (Edição, 3). ISBN 9788521627821. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/978-85-216-2782-1/>>. Acesso em: 30 maio 2021. Citado 8 vezes nas páginas 13, 17, 18, 19, 20, 21, 22 e 23.
- BALANIS, C. A. *Teoria de Antenas - Análise e Síntese*. Rio de Janeiro, 2008. v. 2. (Edição, 3). ISBN 9788521627852. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/978-85-216-2785-2/>>. Acesso em: 30 maio 2021. Citado 4 vezes nas páginas 23, 24, 25 e 27.
- BRICKELL, F.; WESTCOTT, B. Phase and power density distributions on plane apertures of reflector antennas. *Journal of Physics A: Mathematical and General*, IOP Publishing, v. 11, n. 4, p. 777, 1978. Citado na página 33.
- DAI, G.-m. Comparison of wavefront reconstructions with zernike polynomials and fourier transforms. Slack Incorporated Thorofare, NJ, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 32.
- DAI, G.-m. Zernike aberration coefficients transformed to and from fourier series coefficients for wavefront representation. *Optics letters*, Optical Society of America, v. 31, n. 4, p. 501–503, 2006. Citado na página 32.
- DEFLEUR, M. L.; BALL-ROKEACH, S. *Teorias da comunicação de massa*. Rio de Janeiro: Zahar, 1993. Citado na página 13.
- EMBRATEL. *Galeria Satélites - Star One C3*. 2021. Disponível em: <[https://photos.google.com/share/AF1QipPAJefFfRqc9Ym\\_Or2Bb4JQQeEYTQdPHy5xMTIlyBejmFtliq0Cm5FUMphDTHmcQ?key=aWoyREptbWRNcVNYTktJNTlhT1MwMjRjD2UtT0tR](https://photos.google.com/share/AF1QipPAJefFfRqc9Ym_Or2Bb4JQQeEYTQdPHy5xMTIlyBejmFtliq0Cm5FUMphDTHmcQ?key=aWoyREptbWRNcVNYTktJNTlhT1MwMjRjD2UtT0tR)>. Acesso em: 1 jun. 2021. Citado na página 40.
- EMBRATEL. *Área de Cobertura - Star One C3*. 2021. Disponível em: <[https://www.embratel.com.br/documento/embratel\\_star\\_one\\_c3.pdf](https://www.embratel.com.br/documento/embratel_star_one_c3.pdf)>. Acesso em: 1 maio 2021. Citado na página 35.
- IBGE. *Sinopse do censo demográfico : 2010 / IBGE*. Rio de Janeiro: [s.n.], 2011. ISBN 9788524041877. Citado na página 14.

JANKOV, M. et al. Frentes de ondas (wavefronts) e limites da visão humana parte 1: fundamentos. *Arquivos brasileiros de oftalmologia*, SciELO Brasil, v. 65, n. 6, p. 679–684, 2002. Citado na página 29.

LAKSHMINARAYANAN, V.; FLECK, A. Zernike polynomials: a guide. *Journal of Modern Optics*, Taylor & Francis, v. 58, n. 7, p. 545–561, 2011. Citado na página 29.

MOREIRA, F. *Conjunto de Alimentadores para Antenas Refletoras com Feixes Modulados*. Dissertação (Mestrado) — CETUC—Centro de Estudos em Telecomunicações da Pontifícia Universidade Católica do Rio do Janeiro PUC-Rio, 1992. Citado na página 15.

NOBELPRIZE.ORG. *Frits Zernike – Biographical*. 2021. Disponível em: <<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1953/zernike/biographical>>. Acesso em: 1 jun. 2021. Citado na página 29.

PENCHEL, R. A. *Síntese de Antenas Refletoras Utilizando Seções Cônicas e Superfícies Quádricas Confocais*. Tese (Doutorado) — PUC—Rio, 2014. Citado na página 20.

SILVEIRA, M. D. P. da. Efeitos da globalização e da sociedade em rede via internet na formação de identidades contemporâneas. *Psicologia: ciência e profissão*, Conselho Federal de Psicologia, v. 24, n. 4, p. 42–51, 2004. Citado na página 13.

SORENSEN, S. et al. Synthesis of the aperture field for a contoured beam. In: IET. *1991 Seventh International Conference on Antennas and Propagation, ICAP 91 (IEE)*. [S.l.], 1991. p. 334–337. Citado 6 vezes nas páginas 28, 29, 32, 35, 37 e 39.

STUTZMAN L. W.; THIELE, A. G. *Teoria e Projeto de Antenas*. Rio de Janeiro, 2016. v. 1. (Edição, 3). ISBN 9788521632849. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521632849/>>. Acesso em: 30 maio 2021. Citado 3 vezes nas páginas 18, 23 e 24.

VISSER, H. J. *Teoria e aplicações de antenas*. Rio de Janeiro, 2015. (Edição, 1). Citado na página 13.

WESTCOTT, B.; ZAPOROZHETS, A. Fast synthesis of aperture distributions for contoured beam reflector antennas. *Electronics Letters*, IET, v. 29, n. 20, p. 1735–1737, 1993. Citado na página 28.

WESTCOTT, B.; ZAPOROZHETS, A.; SEARLE, A. Smooth aperture distribution synthesis for shaped beam reflector antennas. *Electronics Letters*, IET, v. 29, n. 14, p. 1275–1276, 1993. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 28.

# Anexos

# ANEXO A – Normas e Regulamentação

Para que as empresas responsáveis pelo controle e monitoramento dos satélites artificiais possam operar no mercado e território nacional elas devem seguir algumas normas e regulamentações impostas pela ANATEL. Sendo assim, abaixo tem-se as principais leis, resoluções e portarias que as operadoras têm que seguir.

- Lei nº 9.295, de 19 de julho de 1996 - Dispõe sobre os serviços de telecomunicações e sua organização, sobre o órgão regulador e dá outras providências.
- Resolução nº 75, de 16 de dezembro de 1998 - Aprova o Regulamento sobre as Condições de Uso de Radiofrequências abaixo de 1 GHz por Sistemas de Satélites não Geoestacionários.
- Resolução nº 220, de 5 de abril de 2000 - Aprova o Regulamento sobre o Direito de Exploração de Satélite para Transporte de Sinais de Telecomunicações.
- Resolução nº 266, de 22 de junho de 2001 - Atribui a faixa de frequências de 18,1 GHz a 18,6 GHz ao Serviço Fixo por Satélite.
- Resolução nº 267, de 27 de junho de 2001 - Aprova o Regulamento sobre o Pagamento de Recuperação de Custos Referentes a Publicações de Informações de Redes de Satélites.
- Resolução nº 277, de 26 de setembro de 2001 - Aprova alteração da Norma nº 16/97 – Serviço Móvel Global por Satélite Não-Geoestacionário – SMGS.
- Resolução nº 285, de 12 de dezembro de 2001 - Atribui a faixa de radiofrequências de 1427 MHz a 1429 MHz ao serviço de operação espacial.
- Resolução nº 288, de 21 de janeiro de 2002 - Aprova a Norma das Condições de Operação de Satélites Geoestacionários em Banda Ku com Cobertura sobre o Território Brasileiro.
- Resolução nº 378, de 24 de setembro de 2004 - Aprova o modelo de Termo de Direito de Exploração de Satélite Estrangeiro.
- Resolução nº 515, de 10 de outubro de 2008 - Destina a faixa de radiofrequências de 143,60 MHz a 143,65 MHz ao Serviço Limitado Privado, para uso em aplicações de Pesquisa Espacial, sentido espaço para Terra.
- Resolução nº 548, de 8 de novembro de 2010 - Regulamento para Avaliação da Eficiência de Uso do Espectro de Radiofrequências.

- Resolução nº 593, de 7 de junho de 2012 - Aprova a Norma para o Licenciamento de Estações Terrenas.
- Resolução nº 599, de 30 de outubro de 2012 - Aprova a Norma das Condições de Operação de Satélites Geoestacionários em Banda Ka com Cobertura sobre o Território Brasileiro.
- Resolução nº 614, de 28 de maio de 2013 - Aprova o Regulamento do Serviço de Comunicação Multimídia e altera os Anexos I e III do Regulamento de Cobrança de Preço Público pelo Direito de Exploração de Serviços de Telecomunicações e pelo Direito de Exploração de Satélite.
- Resolução nº 651, de 13 de abril de 2015 - Aprova o Regulamento do Serviço Limitado Móvel Aeronáutico e do Serviço Limitado Móvel Marítimo.
- Resolução nº 685, de 09 de outubro de 2017 - Aprova a atribuição e destinação de faixas de radiofrequências, ao Serviço Limitado Privado (SLP), para aplicações de captação e transmissão de dados científicos relacionados à exploração da Terra por satélite, auxílio à meteorologia, meteorologia por satélite, operação espacial e pesquisa espacial.
- Portaria nº 1637, de 23 de novembro de 2017 - Aprova o Procedimento de Fiscalização para Radiomonitoração de Satélites Geoestacionários (MSAT).
- Resolução nº 702, de 01 de novembro de 2018 - Aprova o Regulamento de cobrança de Preço Público pelo Direito de Exploração de Satélite e estabelece o Preço Público para a autorização, a adaptação, a consolidação e a transferência de autorização, permissão e concessão de serviços de telecomunicações.

Algumas empresas também segue as normas estabelecidas pela *International Telecommunication Union* (ITU), como é o caso da Embratel que tem como referência a recomendação:

- Recomendação ITU-R S.580-6 “Radiation Diagrams for Use as Design Objectives for Antennas of Earth Stations Operating with Geostationary Satellites” com destaque para os itens 1 e 2.

# ANEXO B – Principais Características do Satélite Star One C3

## STAR ONE C3

### Principais Características

- **Posição orbital:** 75°W
- **Nº de transponders:**
  - Banda C: 28 x 36 MHz
  - Banda Ku: 16 x 72 MHz
- **Frequências:**
  - Banda C: 5850 MHz a 6425 MHz subida e 3625 MHz a 4200 MHz descida
  - Banda Ku: 13750 MHz a 14500 MHz subida, 10950 MHz a 11200 MHz descida e 11700 MHz a 12200 MHz descida
- **EIRP típica:**
  - Banda C: 41,0 dBW
  - Banda Ku: Brasil (Sul + Sudeste + Nordeste): 52,0 dBW  
Andino: 51,0 dBW
- **G/T típico:**
  - Banda C: 1,0 dB/K
  - Banda Ku: Brasil (Sul + Sudeste + Nordeste): 6,0 dB/K  
Andino: 3,0 dB/K
- **Fluxo de saturação típico:**
  - Banda C: -86 dBW/m<sup>2</sup> (referência: G/T = -2,5 dB/K)
  - Banda Ku: Brasil: -88 dBW/m<sup>2</sup> (referência: G/T = 1,0 dB/K)  
Andino: -88 dBW/m<sup>2</sup> (referência: G/T = 1,0 dB/K)
- **Frequências de Beacon:**
  - Banda C: 4199,0 MHz e 4199,5 MHz (ambos na polarização Horizontal)
  - Banda Ku: 11700,75 MHz (polarização Horizontal) e 12199,55 MHz (polarização Vertical)
- **Polarização:** Linear
- **Fabricante (modelo):** Orbital Sciences Corporation (Star 2.4E)
- **Veículo de lançamento:** Arianespace

Obs.: dados sujeitos a modificações.

Star One S.A.

Avenida Presidente Vargas 1012 – 6º andar – CEP 20071-910 – Rio de Janeiro – RJ – Brasil  
Tel.: 0800 701 7827 www.starone.com.br

**Embratel**  
star one

# ANEXO C – Área de Cobertura na Banda Ku do Satélite Star One C3





## ANEXO X - TERMO DE RESPONSABILIDADE

O texto do trabalho de conclusão de curso intitulado “ Síntese do campo da abertura de antenas offset para prover cobertura do território brasileiro ” é de minha inteira responsabilidade. Declaro que não há utilização indevida de texto, material fotográfico ou qualquer outro material pertencente a terceiros sem a devida citação ou consentimento dos referidos autores.

João Monlevade, 15 de julho de 2021 .

Sávio Vieira Lacerda da Silva  
Nome completo do(a) aluno(a)