



**Sandro Rogério Zang**

**Síntese e Análise Rigorosa de Antenas  
Omnidirecionais de Duplo-Refletores: O Caso  
do Refletor Principal com Geratriz Circular**

**Tese de Doutorado**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. José Ricardo Bergmann

Rio de Janeiro  
Fevereiro de 2010



**Sandro Rogério Zang**

**Síntese e Análise Rigorosa de Antenas  
Omnidirecionais de Duplo-Refletores: O Caso  
do Refletor Principal com Geratriz Circular**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. José Ricardo Bergmann**  
**Orientador**

Centro de Estudos em Telecomunicações /PUC-Rio

**Prof. Flavio José Vieira Hasselmann**

Centro de Estudos em Telecomunicações /PUC-Rio

**Prof. Luiz Costa da Silva**  
Consultor Independente

**Prof. Fernando José da Silva Moreira**  
UFMG

**Prof. Gervásio Protásio dos Santos Cavalcante**  
UFPA

**Prof. Jose Ricardo Descardec**  
UFT

**Prof. José Eugenio Leal**  
Coordenador Setorial do Centro  
Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 26 de fevereiro de 2010

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

### **Sandro Rogério Zang**

Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Maria (2003), e mestrado em Engenharia Elétrica na área de concentração de Eletromagnetismo Aplicado pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (2005).

#### Ficha Catalográfica

Zang, Sandro Rogério

Síntese e análise rigorosa de antenas omnidirecionais de duplo-refletores: O caso do refletor principal com geratriz circular / Sandro Rogério Zang; orientador: José Ricardo Bergmann. – 2010.

315 f. : il. (color.) ; 30 cm

Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Elétrica – Teses. 2. Antenas duplo-refletores para cobertura omnidirecional. 3. Ótica Geométrica. 4. Método do Casamento de Modos. 5. Método dos Momentos. 6. Métodos híbridos. I. Bergmann, José Ricardo. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

À minha família.

## Agradecimentos

Ao meu orientador Prof. José Ricardo Bergmann pelo estímulo, paciência, orientação e amizade, fundamentais em todas as etapas do desenvolvimento desse trabalho.

À minha família, em especial aos meus pais pelo amor, educação e incentivo, sem eles nada disso seria possível.

À Tatiana pelo amor, carinho e apoio incondicional nas horas mais difíceis.

Aos meus colegas do CETUC e aos amigos do PAA, em especial ao André, Diego, Fábio, Fabrício, Janaína, João Felipe, Juliana, Maiquel, Marco Aurélio, Mariana, Rafael, Pedro, Ramirez e Tiago pelo apoio, companheirismo e amizade, essenciais no dia a dia.

Aos amigos da Vice-Reitoria para Assuntos Acadêmicos, em especial à Ana Lúcia e à Célia pelo carinho e pela amizade.

À Julia e à Sheila pela amizade e pela acolhida em sua casa ao longo desses anos.

À Alcina, Ana Maria, Maria Lúcia e demais funcionários do CETUC e da PUC-Rio.

Ao Centro Tecnológico do Exército (CTEX) pelo apoio na realização de medidas eletromagnéticas em seu laboratório.

Ao CNPq e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais esse trabalho não poderia ter sido realizado.

## Resumo

Zang, Sandro Rogério; Bergmann, José Ricardo. **Síntese e Análise Rigorosa de Antenas Omnidirecionais de Duplo-Refletores: O Caso do Refletor Principal com Geratriz Circular.** Rio de Janeiro, 2010. 315p. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Este trabalho aborda o projeto de antenas omnidirecionais de duplo-refletores, onde o refletor principal é obtido a partir de uma geratriz circular. A antena é composta de refletores circularmente simétricos e concêntricos que são alimentados por uma corneta cônica coaxial excitada pelo modo TEM para a produção de polarização vertical. Para realizar este estudo são utilizadas técnicas de síntese e de análise eletromagnética rigorosa. A técnica de análise eletromagnética rigorosa é baseada na associação do Método de Casamento de Modos para representar os campos no interior do alimentador e do Método dos Momentos para solucionar as equações integrais para o campo elétrico e para o campo magnético e determinar a corrente elétrica induzidas sobre as paredes metálicas externas e a amplitude dos modos sobre a abertura da corneta. A técnica de síntese destas antenas é baseada na aplicação dos princípios da Ótica Geométrica para modelar o subrefletor que irá produzir uma distribuição de fase uniforme em uma abertura cônica colocada em frente ao refletor principal com geratriz circular. O estudo exploratório sobre o desempenho destas antenas é dividido em três partes. Na primeira, as soluções fornecidas pela síntese ótica e aproximações para os campos na abertura são utilizadas para identificar configurações de antenas compactas ou que maximizem o ganho ao longo do plano horizontal. Entretanto, pode-se obter uma melhor iluminação da área de cobertura através da inclinação do lobo principal (*down tilt*). Para reduzir o custo de fabricação de um conjunto de antenas que atendam diferentes áreas de cobertura, pode-se utilizar o mesmo refletor principal e modelar os subrefletores

para deslocar a direção de máximo do diagrama. Assim, em uma segunda etapa do estudo paramétrico, são considerados alguns refletores principais, e, para cada um deles, é obtida uma família de subrefletores modelados para deslocar o máximo do diagrama no plano vertical. Esta estratégia se torna efetiva na medida em que o custo de fabricação do subrefletor é menor do que o do refletor principal. Na terceira parte, utilizando o método híbrido composto pelo Método do Casamento de Modos e pelo Método dos Momentos, é feito o modelamento da corneta coaxial TEM com o objetivo de reduzir sua perda de retorno e estender sua banda de operação. Por fim, ainda utilizando este método híbrido, é feita uma análise rigorosa das antenas duplo-refletores propostas neste trabalho, procurando otimizar o desempenho destas antenas em termos do diagrama de radiação e da perda de retorno.

## **Palavras-chave**

Antenas duplo-refletores para cobertura omnidirecional; Ótica Geométrica; Método do Casamento de Modos; Método dos Momentos; métodos híbridos.

## Abstract

Zang, Sandro Rogério; Bergmann, José Ricardo (Advisor). **Synthesis and Rigorous Analysis of Omnidirectional Dual-Reflector Antennas: The Case of the Main Reflector with Circular Generatrix.** Rio de Janeiro, 2010. 315p. Doctoral Thesis - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This work presents a design study of omnidirectional dual-reflector antennas, where the main reflector is obtained from a circular generatrix. The antenna is composed of two concentric circularly symmetric reflectors and it is fed by a coaxial conical horn excited by TEM mode to produce vertical polarization. To obtain the subreflector surface, the study employs a GO synthesis technique to shape the subreflector in order to produce a uniform phase distribution in a conical aperture placed in front of the main reflector. To validate the results, it is employed a rigorous electromagnetic analysis technique based on the association of Mode Matching Technique to represent the fields inside the horn and Method of Moments to solve the integral equations of electric and magnetic fields. The solution of Method of Moments yields the induced electric current on the outer surface of the horn and the amplitude of the modes on the aperture of the horn. The exploratory study is divided in three parts. First, by using the GO approximations for the aperture fields, the geometry parameters are explored to identify compact antenna configurations that maximize the gain along the horizontal plane. However, a more uniform coverage of the ground can be obtained by tilting the main lobe. Thus, in a second step of the parametric study, it is considered a family of designs with the same main reflector and a set of subreflectors that are designed for different tilt angle of main lobe. This strategy is effective to reduce the manufacturing costs of a family of antennas designed to provide different coverage. Third, by using the hybrid method, the

TEM coaxial horn is shaped to reduce the return loss and extend its operating band, and, finally, the overall antennas performance is optimized by controlling radiation pattern and return loss.

## **Keywords**

Dual-reflector antennas for omnidirectional coverage; Geometrical Optics; Mode Matching Techniques; Method of Moments; hybrids methods.

# Sumário

1	Introdução	29
1.1.	Contextualização do Problema	29
1.2.	Objetivos e Organização do Trabalho	40
2	Método do Casamento de Modos	46
2.1.	Introdução	46
2.2.	Matriz de Espalhamento de uma Descontinuidade de Seção Transversal de Guia de onda coaxial	48
2.2.1.	Cálculo dos Elementos da Matriz [P], para $l = 0$	56
2.2.2.	Cálculo dos Elementos da Matriz [R] para $l = 0$	60
2.2.3.	Cálculo dos Elementos da Matriz [Q], para $l = 0$	62
2.3.	Cascadeamento Progressivo das Matrizes de Espalhamento de Várias Descontinuidades	63
2.3.1.	Matriz de Espalhamento de um Trecho de Guia de Onda Coaxial liso	63
2.3.2.	Matriz de Espalhamento da Associação em Cascata de duas Descontinuidades	65
2.4.	Validação do Algoritmo Numérico Implementado	69
2.4.1.	Primeiro caso	69
2.4.2.	Segundo caso	71
3	Espalhamento eletromagnético de Corpos de Revolução	74
3.1.	Introdução	74
3.2.	Geometria do Corpo de Revolução	75
3.3.	Equações Integrais do Campo Elétrico e do Campo Magnético	76
3.4.	Método dos Momentos	80
3.4.1.	Equação matricial	80
3.5.	Funções de Base e de Teste	86
3.6.	Avaliação Numérica das Matrizes Impedância e Admitância	91
4	Método Híbrido	99
4.1.	Matriz de Espalhamento da Combinação das Equações Integrais de Campo Elétrico e Magnético	100

4.2. Perda de Retorno para o Método Híbrido	101
4.3. Campo Distante	102
4.4. Resultados Numéricos e Validação do Algoritmo Computacional Implementado	106
4.4.1. Guia de Onda Coaxial Aberto	106
4.4.2. Guia de Onda Coaxial Aberto com uma Descontinuidade Interna	114
4.4.3. Guia de Onda Coaxial Aberto com duas Descontinuidades Internas	119
4.4.4. Guia de Onda Coaxial Aberto com três Descontinuidades Internas	123
4.4.5. Corneta Coaxial com Rampa apenas no Condutor Elétrico Externo	127
4.4.6. Corneta Coaxial Apresentada em [18]	132
5 Síntese e Análise de Antenas Duplo-Refletores Circularmente Simétricas para Cobertura Omnidirecional Utilizando a Ótica Geométrica e o Método da Abertura	141
5.1. Introdução	141
5.2. Síntese Ótica do Subrefletor para Fase Uniforme na Abertura da Antena Duplo-Refletores	143
5.2.1. Equação de Mapeamento	146
5.2.2. Considerações sobre as Raízes da Equação de Mapeamento	154
5.2.3. Superfície Cáustica	156
5.3. Desempenho Eletromagnético da Antena Omnidirecional de Duplo-Refletor	162
5.3.1. Expressão Analítica para o Campo na Abertura	163
5.3.2. Definição da Fonte	166
5.3.3. Campos Radiados pela Antena Duplo-Refletores na Região de Campo Distante	169
5.4. Estudo Paramétrico	173
5.4.1. Configuração ODVC	173
5.4.2. Configuração ODRC	184
6 Síntese e Análise de Antenas Duplo-Refletores para Cobertura Omnidirecional com Distribuição de Fase Uniforme e Deslocamento do Feixe de Raios no Plano de Elevação	193
6.1. Introdução	193
6.2. Síntese Ótica do Subrefletor para Fase Uniforme na Abertura com Feixe Deslocado no Plano de Elevação	194
6.3. Desempenho Eletromagnético da Antena Omnidirecional	

de Duplo-Refletor com Feixe Deslocado no Plano de Elevação	204
6.3.1. Campo na Abertura	204
6.3.2. Campos em Região de Campo Distante	207
6.4. Estudo de Casos	209
6.4.1. Configuração ODVC com Deslocamento de Feixe no Plano de Elevação	209
6.4.2. Configuração ODRC com Deslocamento de Feixe no Plano de Elevação	218
7 Análise e Projeto de Antenas Duplo-Refletoras para Cobertura Omnidirecional Através do MMT/MoM	226
7.1. Introdução	226
7.2. Dimensionamento da Corneta Coaxial	228
7.2.1. Otimização da Estrutura de Acoplamento	230
7.2.2. Análise Paramétrica da Abertura da Corneta Coaxial	231
7.2.3. Análise Paramétrica da Corrugação	238
7.3. Análise das Antenas Duplo-Refletora ODVC e ODRC	248
7.3.1. Configuração ODRC	248
7.3.2. Configuração ODVC	257
7.4. Análise das Antenas Duplo-Refletoras ODVC com Deslocamento da Direção de Máxima Radiação no Plano de Elevação	262
8 Conclusões	267
8.1. Conclusões sobre o Trabalho	267
8.2. Sugestões para a Continuidade do Trabalho	271
9 Referências Bibliográficas	273
Apêndice A Campos Modais para Guias de Ondas Coaxiais	280
A.1. Solução da Equação Homogênea em Coordenadas Cilíndricas	280
A.2. Modo Transversal Magnético $TM^Z$	285
A.3. Modo Transversal Elétrico $TE^Z$	290
A.4. Modo Transversal Eletromagnético $TEM^Z$	295
A.5. Modos $TM^Z$ e $TE^Z$ para $l = 0$	296
Apêndice B Limitações Teóricas do MMT Aplicado na Análise de Estruturas Coaxiais	298

Apêndice C Solução de Referência: MoM+IBC	302
C.1. Impedance Boundary Condition – IBC	302
C.2. Solução da Equação Integral do Campo Elétrico (EFIE) através do Método dos Momentos (MoM)	304
Apêndice D Avaliação Numérica e Tratamento das singularidades das Integrais das Matrizes Impedância e Admitância	306
D.1. Avaliação Numérica das Integrais das Matrizes Z e Y	306
D.2. Tratamento das Singularidades	308
Apêndice E Técnica de Otimização	314

## Lista de figuras

Figura 1.1 – Geometria da antena duplo-refletora para cobertura omnidirecional, composta por um subrefletor parabólico e um refletor principal cônico (PACO).	32
Figura 1.2 – Antenas duplo-refletoras omnidirecionais.	34
Figura 1.3 – Geometria da antena duplo-refletora circularmente simétrica para cobertura omnidirecional, com refletor principal obtido a partir de uma geratriz circular.	41
Figura 1.4 – Corneta coaxial TEM utilizada na alimentação de uma antena duplo-refletora para cobertura omnidirecional.	43
Figura 2.1 – Estrutura de acoplamento entre dois guias de onda coaxiais infinitos de dimensões arbitrárias. (a) Visão espacial e (b) seção longitudinal da estrutura de acoplamento.	47
Figura 2.2 – Ilustração dos modos refletidos e transmitidos em cada descontinuidade de guia de onda coaxial.	47
Figura 2.3 – Descontinuidade em guia de onda coaxial: (a) seção longitudinal e (b) seção transversal.	48
Figura 2.4 – Ilustração das amplitudes dos campos incidentes e espalhados na descontinuidade ( $z = 0$ ).	49
Figura 2.5 – Descontinuidade decrescente em guia de onda coaxial.	55
Figura 2.6 – (a) representação das duas matrizes de espalhamento conectadas, (b) representação da matriz de espalhamento geral obtida pelo cascadeamento.	65
Figura 2.7 – Estrutura de acoplamento entre dois guias de onda coaxiais de dimensões distintas.	70
Figura 2.8 – $ S_{11_{00}} $ para a estrutura de acoplamento da Figura 2.7.	71
Figura 2.9 – Estrutura de acoplamento entre dois guias de onda coaxiais de dimensões iguais, utilizando carregamento dielétrico.	72
Figura 2.10 – $ S_{11_{00}} $ para a estrutura de acoplamento da Figura 2.9.	73
Figura 3.1 – Geometria do BOR, visão espacial.	74
Figura 3.2 – Geometria do BOR, visão longitudinal.	75
Figura 3.3 – BOR representando uma estrutura coaxial de irradiação.	76
Figura 3.4 – Densidade de corrente magnética induzida sobre a abertura.	77
Figura 3.5 – Problema equivalente externo.	77

Figura 3.6 – Representação das funções triangulares ao longo da curva geratriz.	88
Figura 3.7 – Representação dos meios triângulos.	88
Figura 3.8 – Representação das funções triangulares associadas a corrente superficial equivalente magnética ao longo da abertura e dos coeficientes da expansão modal $B_{ik}$ para o modo TEM.	89
Figura 4.1 – Guia de onda coaxial aberto, visão espacial.	107
Figura 4.2 – Guia de onda coaxial aberto, corte longitudinal.	107
Figura 4.3 – Análise de convergência para a perda de retorno para a estrutura da Figura 4.1 em função do número de segmentos utilizados na discretização do BOR.	109
Figura 4.4 – Análise de convergência para a perda de retorno para a estrutura da Figura 4.1 em função do número de modos $TM$ .	110
Figura 4.5 – Análise de convergência para a perda de retorno para a estrutura da Figura 4.1 em função do número de segmentos utilizados na discretização da abertura do BOR.	111
Figura 4.6 – Perda de retorno para a estrutura da Figura 4.1.	112
Figura 4.7 – Diagrama de radiação para a estrutura da Figura 4.1 em 1 GHz.	113
Figura 4.8 – Diagrama de radiação para a estrutura da Figura 4.1 em 3 GHz.	113
Figura 4.9 – Diagrama de radiação para a estrutura da Figura 4.1 em 6 GHz.	114
Figura 4.10 – Guia de onda coaxial aberto com uma descontinuidade interna, visão espacial.	115
Figura 4.11 – Guia de onda coaxial aberto com uma descontinuidade interna, corte longitudinal.	116
Figura 4.12 – Análise de convergência para a perda de retorno para a estrutura da Figura 4.10 em função do número de modos $TM$ .	116
Figura 4.13 – Perda de retorno para a estrutura da Figura 4.10.	117
Figura 4.14 – Diagrama de radiação para a estrutura da Figura 4.10 em 1 GHz.	118
Figura 4.15 – Diagrama de radiação para a estrutura da Figura 4.10 em 3 GHz.	118
Figura 4.16 – Diagrama de radiação para a estrutura da Figura 4.10 em 6 GHz.	119
Figura 4.17 – Guia de onda coaxial aberto com duas descontinuidades internas, visão espacial.	120
Figura 4.18 – Guia de onda coaxial aberto com duas descontinuidades	

internas, corte longitudinal.	120
Figura 4.19 – Perda de retorno para a estrutura da Figura 4.17.	121
Figura 4.20 – Diagrama de radiação para a estrutura da Figura 4.17 em 1 GHz.	122
Figura 4.21 – Diagrama de radiação para a estrutura da Figura 4.17 em 3 GHz.	122
Figura 4.22 – Diagrama de radiação para a estrutura da Figura 4.17 em 6 GHz.	123
Figura 4.23 – Guia de onda coaxial aberto com três descontinuidades internas, visão espacial.	124
Figura 4.24 – Guia de onda coaxial aberto com três descontinuidades internas, corte longitudinal.	124
Figura 4.25 – Perda de retorno para a estrutura da Figura 4.23.	125
Figura 4.26 – Diagrama de radiação para a estrutura da Figura 4.23 em 1 GHz.	125
Figura 4.27 – Diagrama de radiação para a estrutura da Figura 4.23 em 3 GHz.	126
Figura 4.28 – Diagrama de radiação para a estrutura da Figura 4.23 em 6 GHz.	126
Figura 4.29 – Corneta coaxial com rampa no condutor elétrico externo, visão espacial.	127
Figura 4.30 – Corneta coaxial com rampa no condutor elétrico externo, corte longitudinal.	127
Figura 4.31 – Análise de convergência para a perda de retorno para a estrutura da Figura 4.29 em função do número de saltos da discretização da corneta coaxial.	128
Figura 4.32 – Análise de convergência para a perda de retorno para a estrutura da Figura 4.29 em função do número de modos TM.	129
Figura 4.33 – Perda de retorno para a estrutura da Figura 4.29.	130
Figura 4.34 – Diagrama de radiação para a estrutura da Figura 4.29 em 1 GHz.	131
Figura 4.35 – Diagrama de radiação para a estrutura da Figura 4.29 em 3 GHz.	131
Figura 4.36 – Diagrama de radiação para a estrutura da Figura 4.29 em 6 GHz.	132
Figura 4.37 – Corneta coaxial apresentada em [18].	133

Figura 4.38 – Dimensões da corneta coaxial apresentada em [18].	133
Figura 4.39 – Análise de convergência para a perda de retorno em função do número de segmentos utilizados na discretização da curva geratriz da corneta coaxial ilustrada na Figura 4.38.	134
Figura 4.40 – Análise de convergência para a perda de retorno em função do número de saltos utilizados na discretização da corneta coaxial ilustrada na Figura 4.38.	136
Figura 4.41 – Análise de convergência para a perda de retorno em função do número de modos <i>TM</i> utilizados em cada seção de guia de onda coaxial da corneta coaxial ilustrada na Figura 4.38.	136
Figura 4.42 – Perda de retorno para a corneta coaxial ilustrada na Figura 4.38, obtida a partir do MMT/MoM e do IBC/MoM.	137
Figura 4.43 – Estrutura de acoplamento da corneta coaxial.	138
Figura 4.44 – Perda de retorno para a corneta coaxial com a presença da estrutura de acoplamento.	138
Figura 4.45 – Diagrama de radiação da corneta coaxial com a presença da estrutura de acoplamento em 8,7 GHz.	139
Figura 4.46 – Diagrama de radiação da corneta coaxial com a presença da estrutura de acoplamento em 9,4 GHz.	139
Figura 4.47 – Diagrama de radiação da corneta coaxial com a presença da estrutura de acoplamento em 10 GHz.	140
Figura 5.1 – Geometria da antena duplo-refletora circularmente simétrica para cobertura omnidirecional.	141
Figura 5.2 – Geometria das geratrizes das superfícies refletoras.	143
Figura 5.3 – Configuração ODRC ( <i>Omnidirectional Dual-Reflector Real Caustic</i> ).	145
Figura 5.4 – Configuração ODVC ( <i>Omnidirectional Dual-Reflector Virtual Caustic</i> ).	146
Figura 5.5 – Mapeamento dos raios que saem do alimentador e incidem sobre a abertura da antena duplo-refletora.	147
Figura 5.6 – Condições de mapeamento impostas sobre os extremos das curvas geratrizes.	150
Figura 5.7 – Solução anômala para a equação de mapeamento –	155
Figura 5.8 – Solução anômala para a equação de mapeamento – ODRC.	156
Figura 5.9 – Superfície cáustica associada ao refletor principal, obtido a partir de uma geratriz circular.	157

Figura 5.10 – Superfície cáustica associada ao refletor principal, obtido a partir de uma geratriz circular – visão tridimensional.	157
Figura 5.11 – Traçado de raios para a configuração ODVC, considerando um refletor principal côncavo.	158
Figura 5.12 – Traçado de raios para a configuração ODRC.	159
Figura 5.13 – Anomalia associada à superfície cáustica, inerente ao formato circular da geratriz do refletor principal, para a configuração ODVC.	160
Figura 5.14 – Anomalia associada à superfície cáustica, inerente ao formato circular da geratriz do refletor principal, para a configuração ODRC.	160
Figura 5.15 – Geometria da geratriz da superfície cáustica.	161
Figura 5.16 – Fluxo de potência para um tubo de raios com incidência normal à abertura, para a configuração ODRC.	163
Figura 5.17 – Corneta coaxial utilizada como alimentador das antenas duplo-refletoras para cobertura omnidirecional.	166
Figura 5.18 – Diagrama do alimentador para frequência central, 9,3 GHz, considerando $R_a = 0,45\lambda_0$ e $R_b = 0,90\lambda_0$ .	168
Figura 5.19 – Diagrama do alimentador para frequência central, 9,3 GHz, considerando $R_a = 0,46\lambda_0$ e $R_b = 0,93\lambda_0$ .	168
Figura 5.20 – Estudo paramétrico do ganho, para a configuração ODVC.	174
Figura 5.21 – Eficiência de transbordamento ( <i>Spillover</i> ) em função de $\theta_E$ .	175
Figura 5.22 – Eficiência de iluminação da abertura, para a configuração ODVC.	175
Figura 5.23 – Módulo do campo elétrico da GO na abertura, para a configuração ODVC.	176
Figura 5.24 – Traçado de raios para a configuração ODVC, sendo $V_S = 4,0\lambda$ e $\theta_E = 60^\circ$ .	177
Figura 5.25 – Traçado de raios para a configuração ODVC, sendo $V_S = 7,75\lambda$ e $\theta_E = 60^\circ$ .	177
Figura 5.26 – Traçado de raios para a configuração ODVC, sendo $V_S = 7,75\lambda$ e $\theta_E = 50^\circ$ .	178
Figura 5.27 – Estudo paramétrico do ganho, para a configuração ODVC – região de máximo ganho.	179
Figura 5.28 – Definição do volume ocupado pela antena duplo-refletora.	179
Figura 5.29 – Estudo paramétrico do volume, para a configuração ODVC.	180

Figura 5.30 – Estudo paramétrico de $D_M$ , para a configuração ODVC.	181
Figura 5.31 – Estudo paramétrico de $D_S$ , para a configuração ODVC.	181
Figura 5.32 – Geratrizes dos refletores, para a configuração ODVC, considerando $\theta_E = 70^\circ$ e $V_S = 3,5\lambda, 5\lambda$ e $7,75\lambda$ .	182
Figura 5.33 – Estudo paramétrico do volume, para a configuração ODVC – Região de ganho máximo.	183
Figura 5.34 – Estudo paramétrico do raio da geratriz do refletor principal, $R_0$ , para a configuração ODVC.	183
Figura 5.35 – Estudo paramétrico do ganho, para a configuração ODRC.	185
Figura 5.36 – Eficiência de iluminação da abertura, para a configuração ODRC.	185
Figura 5.37 – Módulo do campo elétrico da GO na abertura, para a configuração ODRC.	186
Figura 5.38 – Traçado de raios para a configuração ODRC, sendo $D_S = 17\lambda$ e $\theta_E = 60^\circ$ .	187
Figura 5.39 – Traçado de raios para a configuração ODRC, sendo $D_S = 40\lambda$ e $\theta_E = 60^\circ$ .	187
Figura 5.40 – Traçado de raios para a configuração ODVC, sendo $D_S = 40\lambda$ e $\theta_E = 50^\circ$ .	188
Figura 5.41 – Estudo paramétrico do ganho, para a configuração ODRC – região de ganho máximo.	189
Figura 5.42 – Estudo paramétrico do volume, para a configuração ODRC.	190
Figura 5.43 – Estudo paramétrico de $D_M$ , para a configuração ODRC.	190
Figura 5.44 – Estudo paramétrico de $V_S$ , para a configuração ODRC.	191
Figura 5.45 – Estudo paramétrico do volume, para a configuração ODRC – Região de ganho máximo.	192
Figura 5.46 – Estudo paramétrico do raio da geratriz do refletor principal, $R_0$ , para a configuração ODRC.	192
Figura 6.1 – Geometria do deslocamento de feixe no plano de elevação.	194
Figura 6.2 – Geometria do deslocamento de feixe no plano de elevação, em relação aos eixos $x'z'$ .	195
Figura 6.3 – Geometria do deslocamento de feixe no plano de elevação – ODVC.	197

Figura 6.4 – Comportamento da superfície cáustica em função de $\alpha$ , para a configuração ODVC.	199
Figura 6.5 – Comportamento da superfície cáustica em função de $\alpha$ , para a configuração ODRC.	201
Figura 6.6 – Fluxo de potência em um tubo de raios para a configuração ODRC, com deslocamento de feixe no plano de elevação.	205
Figura 6.7 – Comportamento geométrico do subrefletor, para o refletor principal da configuração ODVC de dimensões listadas na Tabela 6.1.	210
Figura 6.8 – Ganho em função de $\alpha$ , para o refletor principal de dimensões listadas na Tabela 6.1 da configuração ODVC.	212
Figura 6.9 – (a) Amplitude do campo elétrico da GO na abertura e (b) diagramas de radiação em função de $\alpha$ , para o refletor principal de dimensões listadas na Tabela 6.1 da configuração ODVC.	213
Figura 6.10 – Análise da geometria e de desempenho eletromagnético em função de $\alpha$ , para a configuração ODVC, considerando $\theta_E^I = 50^\circ$ e $V_S^I = 5,5, 7,75$ e $9\lambda$ .	216
Figura 6.11 – Análise da geometria e de desempenho eletromagnético em função de $\alpha$ , para a configuração ODVC, considerando $V_S^I = 7,75\lambda$ e $\theta_E^I = 40^\circ, 50^\circ$ e $60^\circ$ .	217
Figura 6.12 – Comportamento geométrico do subrefletor, para o refletor principal da configuração ODRC de dimensões listadas na Tabela 6.5.	219
Figura 6.13 – Ganho em função de $\alpha$ , para o refletor principal de dimensões listadas na Tabela 6.5 da configuração ODRC.	220
Figura 6.14 – (a) Amplitude do campo elétrico da GO na abertura e (b) diagramas de radiação em função de $\alpha$ , para o refletor principal de dimensões listadas na Tabela 6.5 da configuração ODRC.	221
Figura 6.15 – Análise da geometria e de desempenho eletromagnético em função de $\alpha$ , para a configuração ODRC, considerando $\theta_E^I = 49^\circ$ e $D_S^I = 20, 30$ e $40\lambda$ .	224
Figura 6.16 – Análise da geometria e de desempenho eletromagnético em função de $\alpha$ , para a configuração ODRC, considerando $D_S^I = 40\lambda$ e $\theta_E^I = 40^\circ, 49^\circ$ e $60^\circ$ .	225
Figura 7.1 – Geometria tridimensional da antena duplo-refletora para cobertura omnidirecional alimentada por uma corneta coaxial TEM.	227

Figura 7.2 – Visão tridimensional da corneta coaxial apresentada em [18].	229
Figura 7.3 – Dimensões da corneta coaxial apresentada em [18].	229
Figura 7.4 – Perda de retorno resultante do processo de otimização do acoplador.	231
Figura 7.5 – Perda de retorno da corneta coaxial para (a) $R_b = 29,1mm$ ( $0,90\lambda_0$ ), (b) $R_b = 29,746mm$ ( $0,92\lambda_0$ ) e (c) $R_b = 30,392mm$ ( $0,94\lambda_0$ ).	233
Figura 7.6 – Diagrama de radiação da corneta coaxial para a frequência de 8 GHz, considerando $R_b = 29,1mm$ ( $0,90\lambda_0$ ).	236
Figura 7.7 – Diagrama de radiação da corneta coaxial para a frequência de 9,3 GHz, considerando $R_b = 29,1mm$ ( $0,90\lambda_0$ ).	236
Figura 7.8 – Diagrama de radiação da corneta coaxial para a frequência de 10,5 GHz, considerando $R_b = 29,1mm$ ( $0,90\lambda_0$ ).	237
Figura 7.9 – Amplitude das componentes transversais do campo elétrico modal presentes na abertura da corneta coaxial para 10,5 GHz, considerando $R_a = 11,31mm$ ( $0,35\lambda_0$ ) e $R_b = 29,1mm$ ( $0,90\lambda_0$ ).	237
Figura 7.10 – Amplitude das componentes transversais do campo elétrico modal presentes na abertura da corneta coaxial para 10,5 GHz, considerando $R_a = 14,5mm$ ( $0,45\lambda_0$ ) e $R_b = 29,1mm$ ( $0,90\lambda_0$ ).	238
Figura 7.11 – Perda de retorno da corneta coaxial em função de $P_C$ .	240
Figura 7.12 – Diagrama de radiação da corneta coaxial para a frequência de 8 GHz, em função de $P_C$ .	240
Figura 7.13 – Diagrama de radiação da corneta coaxial para a frequência de 9,3 GHz, em função de $P_C$ .	241
Figura 7.14 – Diagrama de radiação da corneta coaxial para a frequência de 10,5 GHz, em função de $P_C$ .	241
Figura 7.15 – Corrente elétrica superficial equivalente da corneta coaxial para a frequência de 8 GHz, considerando $P_C = 6,78mm$ ( $0,21\lambda_0$ ).	242
Figura 7.16 – Corrente elétrica superficial equivalente da corneta coaxial para a frequência de 8 GHz, considerando $P_C = 8,7mm$ ( $0,27\lambda_0$ ).	243
Figura 7.17 – Amplitude das componentes transversais do campo elétrico modal presentes na abertura da corneta coaxial para 8 GHz, considerando $P_C = 6,78mm$ ( $0,21\lambda_0$ ).	244

Figura 7.18 – Amplitude das componentes transversais do campo elétrico modal presentes na abertura da corneta coaxial para 8 GHz, considerando $P_C = 8,7mm (0,27\lambda_0)$ .	244
Figura 7.19 – Amplitude do campo elétrico modal presente na abertura da corneta coaxial para 8 GHz, considerando $P_C = 6,78mm (0,21\lambda_0)$ e $P_C = 8,7mm (0,27\lambda_0)$ .	245
Figura 7.20 – Perda de retorno da corneta coaxial em função de $L_C$ .	246
Figura 7.21 – Diagrama de radiação da corneta coaxial para a frequência de 8 GHz, em função de $L_C$ .	246
Figura 7.22 – Diagrama de radiação da corneta coaxial para a frequência de 9,3 GHz, em função de $L_C$ .	247
Figura 7.23 – Diagrama de radiação da corneta coaxial para a frequência de 10,5 GHz, em função de $L_C$ .	247
Figura 7.24 – Diagramas de radiação para a antena duplo-refletores ODRC do Caso I, obtidos a partir do ApM e do MMT/MoM, para a frequência de 9,3 GHz.	250
Figura 7.25 – Comparação entre a perda de retorno da antena duplo-refletores ODRC do Caso I e da corneta coaxial utilizada como alimentador.	251
Figura 7.26 – Comparação entre a perda de retorno da antena duplo-refletores ODRC do Caso I com e sem a presença do refletor principal.	252
Figura 7.27 – Comparação entre a perda de retorno das antenas duplo-refletores ODRC dos Casos I e II e da corneta coaxial.	253
Figura 7.28 – Diagramas de radiação para as antenas duplo-refletores ODRC dos Casos I e II, para 8 GHz.	255
Figura 7.29 – Diagramas de radiação para as antenas duplo-refletores ODRC dos Casos I e II, para 9,3 GHz.	256
Figura 7.30 – Diagramas de radiação para as antenas duplo-refletores ODRC dos Casos I e II, para 10,5 GHz.	256
Figura 7.31 – Fase do diagramas de radiação da corneta coaxial utilizada como alimentador, para a frequência de 10,5 GHz.	257
Figura 7.32 – Diagramas de radiação para a antena duplo-refletores ODVC de dimensões listadas na Tabela 7.8, obtidos a partir do ApM e do MMT/MoM, para a frequência de 9,3 GHz.	258
Figura 7.33 – Comparação entre a perda de retorno da antena duplo-	

refletora ODVC de dimensões listadas na Tabela 7.8 e da corneta coaxial utilizada como alimentador.	259
Figura 7.34 – Comparação entre a perda de retorno da antena duplo-refletora ODVC de dimensões listadas na Tabela 7.8 com e sem a presença do refletor principal.	260
Figura 7.35 – Diagramas de radiação para a antena duplo-refletora ODVC de dimensões listadas na Tabela 7.8, para as frequências de 8 e 10,5 GHz.	261
Figura 7.36 – Antenas duplo-refletoras ODVC de dimensões listadas na Tabela 7.11, considerando $\alpha = 0^\circ, 6^\circ$ e $12^\circ$ .	263
Figura 7.37 – Comparação entre a perda de retorno das antenas duplo-refletoras ODVC de dimensões listadas na Tabela 7.11, considerando $\alpha = 0^\circ, 6^\circ$ e $12^\circ$ , e da corneta coaxial utilizada como alimentador.	264
Figura 7.38 – Diagramas de radiação para as antenas duplo-refletoras ODVC de dimensões listadas na Tabela 7.11, considerando $\alpha = 0^\circ, 6^\circ$ e $12^\circ$ , para a frequência de 8 GHz.	265
Figura 7.39 – Diagramas de radiação para as antenas duplo-refletoras ODVC de dimensões listadas na Tabela 7.11, considerando $\alpha = 0^\circ, 6^\circ$ e $12^\circ$ , para a frequência de 9,3 GHz.	266
Figura 7.40 – Diagramas de radiação para as antenas duplo-refletoras ODVC de dimensões listadas na Tabela 7.11, considerando $\alpha = 0^\circ, 6^\circ$ e $12^\circ$ , para a frequência de 10,5 GHz.	266
Figura A.1 – Geometria do problema proposto. (a) seção de guia de onda coaxial e (b) sistema de coordenadas cilíndricas.	280
Figura A.2 – Representação dos vetores unitários em coordenadas cilíndricas para dois pontos distintos $(\rho_1, \phi_1, z_1)$ e $(\rho_2, \phi_2, z_2)$ .	281
Figura A.3 – $f_{c_{lm}}^{TM}$ em função de $a/b$ para os primeiros modos $TM_{lm}^z$ , obtidos através da solução numérica da equação (A.39), considerando $b = 15mm$ .	290
Figura A.4 – Distribuição das componentes transversais de campo no interior do guia de onda coaxial para o modo $TM_{01}^z$ .	290
Figura A.5 – $f_{c_{lm}}^{TE}$ em função de $a/b$ para os primeiros modos $TE_{lm}^z$ , obtidos através da solução numérica da equação (A.75), considerando $b = 15mm$ .	294
Figura A.6 – Distribuição das componentes transversais de campo no	

interior do guia de onda coaxial para os modos (a) $TE_{11}^z$ e (b) $TE_{21}^z$ .	294
Figura A.7 – Distribuição das componentes transversais de campo no interior do guia de onda coaxial para o modo $TEM^z$ .	296
Figura B.1 – Estrutura de acoplamento entre dois guias de onda coaxiais de dimensões diferentes.	298
Figura B.2 – Estrutura de acoplamento com deslocamento $G$ no cilindro condutor central (a) para a direita e (b) para a esquerda.	299
Figura C.1 – Representação da IBC como parede de absorção do modo TEM.	303
Figura E.1 – Visualização da função objetivo $F(x)$ .	315

## Lista de tabelas

Tabela 2.1 – Dimensões da estrutura de acoplamento da Figura 2.7.	70
Tabela 2.2 – Dimensões da estrutura de acoplamento da Figura 2.9.	72
Tabela 6.1 – Estudo de casos para a configuração ODVC, considerando o refletor principal referente à $V_S^I = 7,75\lambda$ e $\theta_E^I = 50^\circ$ .	209
Tabela 6.2 – Comportamento geométrico e eletromagnético, para o refletor principal da configuração ODVC de dimensões listadas na Tabela 6.1.	211
Tabela 6.3 – Dimensões para as estruturas iniciais do estudo de casos para a configuração ODVC, referente à variação de $V_S^I$ .	214
Tabela 6.4 – Dimensões para as estruturas iniciais do estudo de casos para a configuração ODVC, referentes à variação de $\theta_E^I$ .	215
Tabela 6.5 – Estudo de casos para a configuração ODRC, considerando $D_S^I = 40\lambda$ e $\theta_E^I = 49^\circ$ .	218
Tabela 6.6 – Comportamento geométrico e eletromagnético, para o refletor principal da configuração ODRC de dimensões listadas na Tabela 6.5.	219
Tabela 6.7 – Dimensões para as estruturas iniciais do estudo de casos para a configuração ODRC, referente à variação de $D_S^I$ .	222
Tabela 6.8 – Dimensões para as estruturas iniciais do estudo de casos para a configuração ODRC, referentes à variação de $\theta_E^I$ .	223
Tabela 7.1 – Dimensões em milímetros da estrutura de acoplamento, abertura e corrugação da corneta coaxial apresentada em [18].	230
Tabela 7.2 – Dimensões em milímetros da estrutura de acoplamento otimizada.	230
Tabela 7.3 – Análise paramétrica do diagrama de radiação em função de $R_a$ e $R_b$ , para as frequências de 8, 9,3 e 10,5 GHz.	235
Tabela 7.4 – Dimensões da antena duplo-refletora ODRC do Caso I, para $D_S=20\lambda_0$ e $\theta_E=45^\circ$ .	249
Tabela 7.5 – Desempenho eletromagnético da antena duplo-refletora ODRC do Caso I, obtido a partir do ApM e do MMT/MoM, para 9,3 GHz.	250
Tabela 7.6 – Dimensões da antena duplo-refletora ODRC do Caso II, considerando $D_S=24,5\lambda_0$ e $\theta_E=60^\circ$ .	252

Tabela 7.7 – Desempenho eletromagnético das antenas duplo-refletoras ODRC dos Casos I e II, para as frequências de 8, 9,3 e 10,5 GHz.	255
Tabela 7.8 – Dimensões da antena duplo-refletora ODVC, considerando $V_S=7,75\lambda_0$ e $\theta_E=50^\circ$ .	258
Tabela 7.9 – Desempenho eletromagnético da antena duplo-refletora ODVC, de dimensões listadas na Tabela 7.8, obtido a partir do ApM e do MMT/MoM, para 9,3 GHz .	258
Tabela 7.10 – Desempenho eletromagnético da antena duplo-refletora ODVC de dimensões listadas nas Tabelas 7.8, para as frequências de 8 e 10,5 GHz.	261
Tabela 7.11 – Dimensões das antenas duplo-refletoras ODVC dadas em $\lambda_0$ , considerando $V_S^I = 7,75\lambda_0$ e $\theta_E^I = 40^\circ$ , para $\alpha = 0^\circ, 6^\circ$ e $12^\circ$ .	263
Tabela 7.12 – Desempenho eletromagnético das antenas duplo-refletoras ODVC de dimensões listadas na Tabela 7.11, para as frequências de 8, 9,3 e 10,5 GHz.	265
Tabela B.1 – Dimensões dos cilindros condutores interno e externo para o acoplador da Figura B.1.	298

## Lista de siglas

ABC	Absorbing Boundary Condition
ApM	Aperture Method
BOR	Bodies of revolution
CEP	Condutor elétrico perfeito
EFIE	Electric Field Integral Equation
ER	Estações remotas
ERB	Estação rádio base
FBT	Funções de base triangulares
FDD	Frequency Division Duplexing
FDM	Finite Difference Method
FDTD	Finite-Difference in Time-Domain
FEM	Finite Element Method
GO	Geometrical Optics
GTD	Geometrical Theory of Diffraction
IBC	Impedance Boundary Condition
LMDS	Local Multipoint Distribution System
MFIE	Magnetic Field Integral Equation
MMT	Mode Matching Technique
MoM	Method of Moments
OADC	Omnidirectional Axis-Displaced Cassegrain
OADE	Omnidirectional Axis-Displaced Ellipse
OADG	Omnidirectional Axis-Displaced Gregorian
OADH	Omnidirectional Axis-Displaced Hyperbola
ODRC	Omnidirectional Dual-Reflector Real Caustic
ODVC	Omnidirectional Dual-Reflector Virtual Caustic
PACO	Parábola mais cone
PML	Perfect Matched Layer
PO	Physical Optics
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QPSK	Quadriphase-Shift Keying
SMC	Serviço móvel celular
TDD	Time Division Duplexing
TE	Transverse Electric

TEM	Transverse Electromagnetic
TM	Transverse Magnetic
VoIP	Voice over Internet Protocol
VPN	Virtual Private Network