

## 5

### Síntese de refletores circularmente simétricos alimentados por diagrama com dependência azimutal $n=0$

#### 5.1

##### Introdução

Para operação de “*Local Multipoint Distribution Service*” (LMDS) a literatura apresenta exemplos de projetos de antenas refletoras omnidirecional [27-30], [32],[33]. Nestes trabalhos os projetos são baseados nas propriedades óticas dos refletores, onde o desempenho dessas antenas é limitado pelas dimensões e pelos modelos de alimentadores. Visando melhorar o desempenho destas antenas, similar ao que apresentado no Capítulo 3, este capítulo mostrar algoritmo de modelamento que associa técnicas de otimização ao método de análise apresentado no Capítulo 4 para alimentadores com dependência azimutal  $n=0$ . Este algoritmo será utilizado para controlar o diagrama no plano vertical de antenas omnidirecionais.

#### 5.2

##### Caso de antenas refletoras omnidirecional com um único refletor

A utilização de uma geratriz parabólica é uma solução analítica intuitiva. Com o auxílio da Figura 5.1, pode-se escrever a expressão para esta geratriz em função da distância ao vértice ( $V_S$ ), do tamanho da abertura ( $W_A$ ). E do ângulo de deslocamento em relação ao horizonte ( $\alpha$ ).

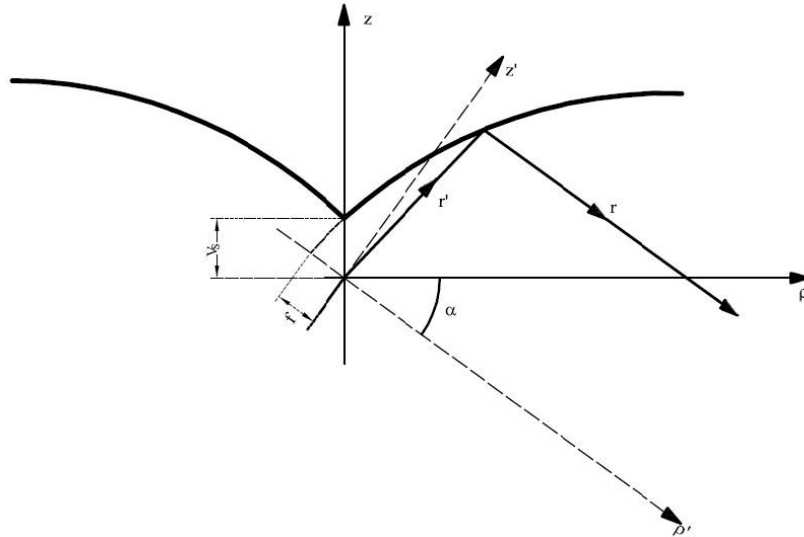


Figura 5.1 – Deslocamento no eixo de simetria para aplicação de *tilt* no ganho máximo.

Utilizando a Equação (4.41) para representar a parábola, o deslocamento do feixe em relação ao horizonte requer a rotação do sistema de coordenados em relação ao eixo de simetria da curva, substituindo  $z(\rho)$  e  $\rho$  da equação por  $z'(\rho(\alpha))$  e  $\rho'(\alpha)$  dados pelas Equações em (5.1).

$$\begin{aligned} z'(\rho(\alpha)) &= z(\rho) \cos \alpha - \rho \operatorname{sen} \alpha \\ \rho'(\alpha) &= \rho \cos \alpha + z(\rho) \operatorname{sen} \alpha \end{aligned} \quad (5.1)$$

Após as substituições algébricas se obtém uma nova equação para  $z(\rho)$  da superfície que considerando a rotação desejada, ou seja, o ganho máximo é direcionado para a direção de  $90^\circ + \alpha$ , conforme podemos conferir na Equação (5.2).

$$z_p(\rho) = \frac{-B(\rho) + \sqrt{B^2(\rho) - 4A(\alpha)C(\rho)}}{2A(\alpha)} \quad (5.2)$$

onde,

$$\begin{aligned} A(\alpha) &= \cos^2 \alpha \\ B(\rho(\alpha)) &= -[2\rho \cos \alpha \operatorname{sen} \alpha + 4f \operatorname{sen} \alpha] \\ C(\rho(\alpha)) &= (\rho \operatorname{sen} \alpha)^2 - 4[f(\rho \cos \alpha + f)] \end{aligned} \quad (5.3)$$

Para ilustrar o desempenho obtido por este tipo de antena, a Figura 5.2 mostra o diagrama de radiação no plano vertical para uma antena com as seguintes características: diâmetro de  $37,52 \lambda$ ,  $V_s=5,72 \lambda$ ,  $W_a=10 \lambda$  e ângulo de iluminação de borda em torno de  $46,9^\circ$ . Como primeiro exemplo, foi considerado o caso com máximo do diagrama em  $\theta=96^\circ$ , ou  $\alpha=6^\circ$ . Para fins de comparação foi analisado o mesmo caso pelo método de referência, o MoM, conforme ilustra a Figura 5.2.

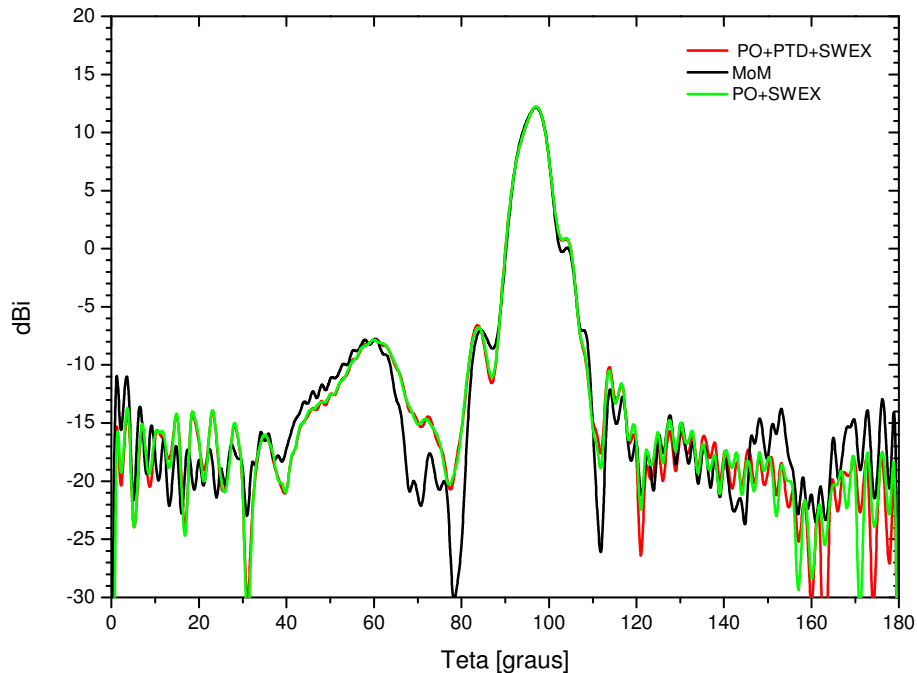


Figura 5.2 – Diagrama de uma antena omnidirecional com o ganho máximo deslocado para  $96^\circ$ .

Observando a Figura 5.2 nota-se o ganho máximo está posicionado em  $96^\circ$ , como esperado. Na comparação entre os métodos desenvolvidos e o MoM, no ponto de máximo as diferenças ficam na ordem de 0.1 dB, e na região de lóbulos laterais aparecem diferenças mais acentuadas principalmente em regiões de níveis mais baixos.

Um segundo caso de deslocamento do ganho máximo foi realizado com  $\alpha=15^\circ$ , ou seja, para  $\theta=105^\circ$ , com este deslocamento no eixo na geratriz da superfície o ângulo de iluminação de borda passou para  $42,5^\circ$ . Os diagramas gerado pelos métodos implementados são mostrada na Figura 5.3, onde são comparados com o MoM.

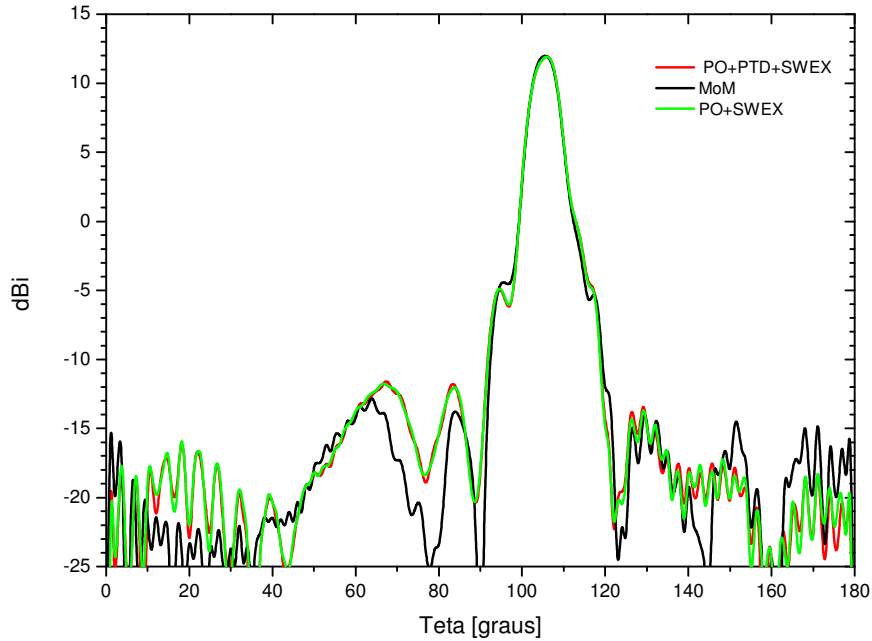


Figura 5.3 – Diagrama de radiação da antena refletora omnidirecional com máximo ganho descolado para 105°.

Assim como no caso anterior, no ponto de máximo as diferenças ficam na ordem de 0.1dB na comparação com MoM, e na região de lóbulos laterais as diferenças se acentuaram mais, devido ao aumento de transbordamento na borda do refletor com a redução do ângulo de incidência de iluminação. A Figura 5.4 ilustra as formas das superfícies gerada pelos deslocamentos que acarretou na radiação do máximo ganho à 96° e 105°, e comparando com uma parábola a 90°.

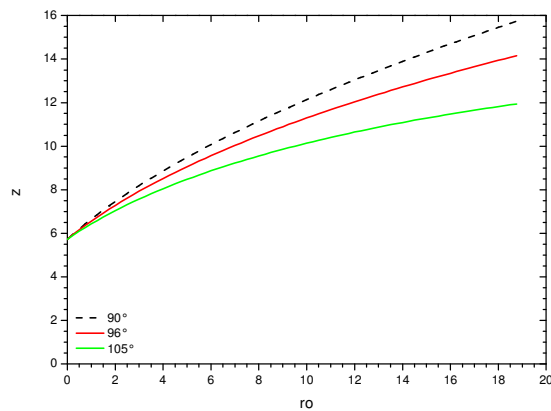


Figura 5.4 – Geratrizes das antenas com ganho máximo em 96° e 105° comparados a parábola a 90°.

Apesar das antenas refletoras com geratriz parabólicas apresentarem em sua abertura uma fase uniforme, sua distribuição de energia nem sempre é uniforme sobre a abertura. Alternativamente, pode-se sacrificar essa uniformidade da fase para produzir a distribuição de campo mais uniforme sobre a abertura e conseqüentemente, maximizar o ganho. Exemplos de síntese de antenas refletoras de um único refletor que radiam omnidirecionalmente pode ser encontrada em [28].

De modo similar ao foi descrito no Capítulo 3, a geratriz  $z(\rho)$  do refletor representado por uma expansão de funções base e os coeficientes desta expansão ajustados para otimizar o ganho na direção de  $\theta = 90^\circ$ .

$$z(\rho) = Z_p + \sum b_\delta f_\delta(\tau) \quad (5.4)$$

onde  $Z_p$  é dado pela Equação (5.2) e

$$\tau = \frac{\pi\rho}{2R_A}, \quad (5.5)$$

sendo,

$$f_\delta(\tau) = 1, \sin(\tau), \cos(\tau), \sin(2\tau), \cos(2\tau), \sin(3\tau), \cos(3\tau) \text{ para } \delta = 1, 2, 3, 4, 5 \dots \quad (5.6)$$

No processo de modelamento da geratriz, similar ao descrito no Capítulo 3, há necessidade de definir etapas na síntese. Para observar o comportamento da síntese em relação ao número de termos da Série de Fourier utilizou se inicialmente 3 termos. Subseqüentemente foram realizados acréscimos gradativos de dois termos na expansão (Equação (5.4)) até o número de 11 termos na Série de Fourier, obtendo assim famílias de otimizações, conforme ilustrada na Tabela 5.1.

Na notação utilizada para representa cada caso,  $\delta_\delta(\text{família})$ , o primeiro dígito ( $\delta$ ) representa o número de termos otimizados no caso e o segundo dígito ( $\delta(\text{família})$ ) representa o número de termos não nulos na solução utilizada para inicializar o processo iterativo de otimização.

Tabela 5.1 – Resultado das otimizações para família 3.

$\delta_{\delta}(\text{família})$	$W_A (\lambda)$	$V_S (\lambda)$	$G_{\max} (\text{dBi})$
3_3	10.07	5.53	12.43
5_3	5.28	-1.09	> 50.00
7_3	>20.00	-1.4	> 50.00
9_3	10.44	5.39	12.54
11_3	>20.00	-20.00	16.00

Os casos de otimizações da família 3 apresentados na Tabela 5.1 apresentaram situações esperadas, como o caso de 3 termos (3\_3) que apresentou um aumento no ganho de 0.5dB e o caso de 11 termos (11\_3) que apresentou um aumento de 0.6dB, este aumento de ganho nos casos ocorreram devido a redução da distancia entre o vértice da superfície e o alimentador ( $V_S$ ). Entretanto, em alguns casos, os resultados encontrados apresentaram anomalias, como os casos 5\_3, 7\_3 e 11\_3, nos quais observa-se um  $V_S$  negativos, indicando que a superfície esta atrás ou sobre o alimentador, A Figura 5.5 ilustra a geratriz gerada pelo caso anômalo 7\_3.

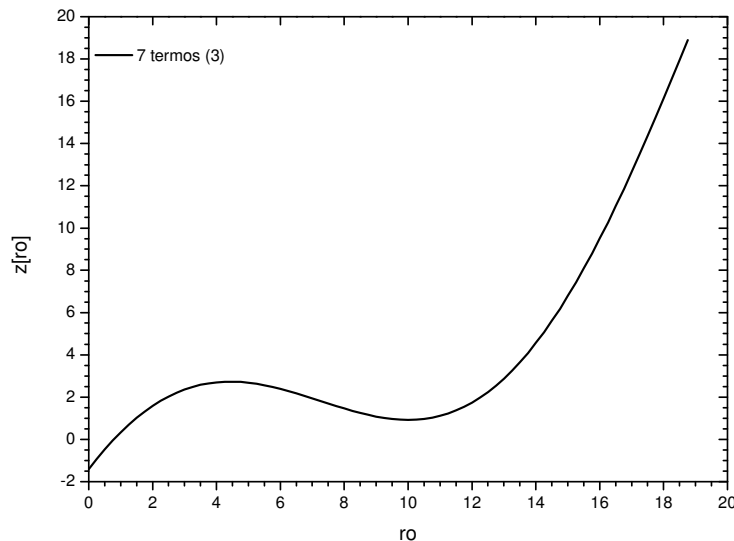


Figura 5.5 – Geratrizes anômala gerada pela otimização para maximizar o ganho da antena refletora omnidirecional do caso 7\_3.

O processo de formação de família de otimizações foi repetido com 5, 7 e 9 termos iniciais. Entre as outras famílias foram observados as mesmas anomalias nos resultados.

A Tabela 5.2 ilustra os melhores casos encontrados nas otimizações realizadas com as famílias 3, 5, 7 e 9. Onde o aumento do ganho ocorreu devido a melhor iluminação do refletor, pela redução do  $V_S$ .

Tabela 5.2 – Resultado dos melhores casos das otimizações realizadas pelas famílias 3,5,7 e 9.

$\delta_\delta(\text{família})$	$W_A (\lambda)$	$V_S (\lambda)$	$G_{\max} (\text{dBi})$
3_3	10.07	5.53	12.43
11_7	10.44	5.39	12.54

Os diagramas de radiação e as geratrizes das superfícies geradas por estes dois casos são ilustradas nas Figuras 5.6 e 5.7, respectivamente.

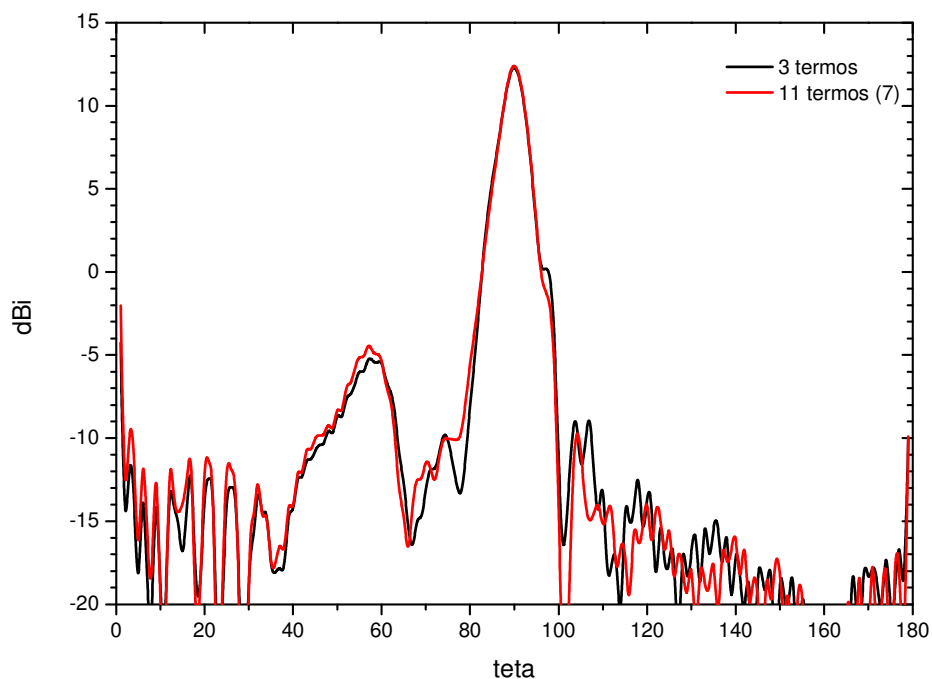


Figura 5.6 – Diagrama de Radiação da análise PO+CF da otimização para maximizar o ganho da antena refletora omnidirecional.

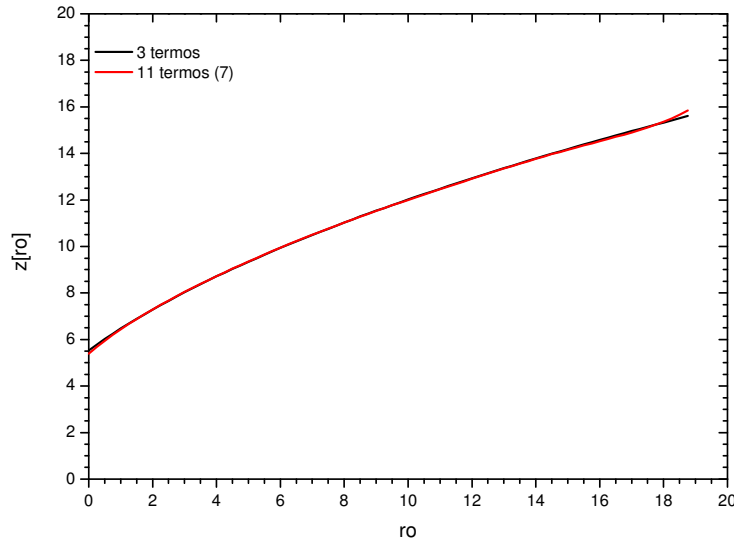


Figura 5.7 – Geratrizes geradas pelas otimizações para maximizar o ganho da antena refletora omnidirecional.

Na tentativa de evitar a ocorrência de resultados com anomalias, optou-se por fixar o  $V_S$  no processo de otimização, garantindo a manutenção da distância entre o vértice da superfície e o alimentador, assim evitando que durante as otimizações o  $V_S$  se torne negativo, tornando o resultado fisicamente descartável.

Neste novo conjunto de otimizações foi adotado o mesmo critério utilizado anteriormente com adoção das famílias e variação de 3 a 11 termos na Série de Fourier. Os melhores casos encontrados com o vértice fixo são demonstradas na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Resultado das otimizações realizadas na antena refletor com radiação omnidirecional na busca de maximizar o ganho com  $V_S$  fixo.

$\delta\_ \delta(\text{família})$	$W_A (\lambda)$	$V_S (\lambda)$	$G_{\max} (\text{dBi})$
5_5	10.18	5.72	12.36
11_7	10.16	5.72	12.45

A Tabela 5.3 ilustra que o  $V_S$  fixo em todos os casos, como esperado. Em consequência desta fixação de  $V_S$  o caso de 5 termos da família 5 foi otimizado sem apresentar anomalias. Outra consequência da fixação do vértice, que na



prática se traduz em uma restrição, o caso otimizado com 11 termos da família 7 apresentou uma redução na ordem de 0.1dB no ganho comparado o gerado sem a fixação de  $V_S$ . Os diagramas de radiação e geratrizes das superfícies modeladas são ilustradas nas Figuras 5.8 e 5.9, respectivamente.

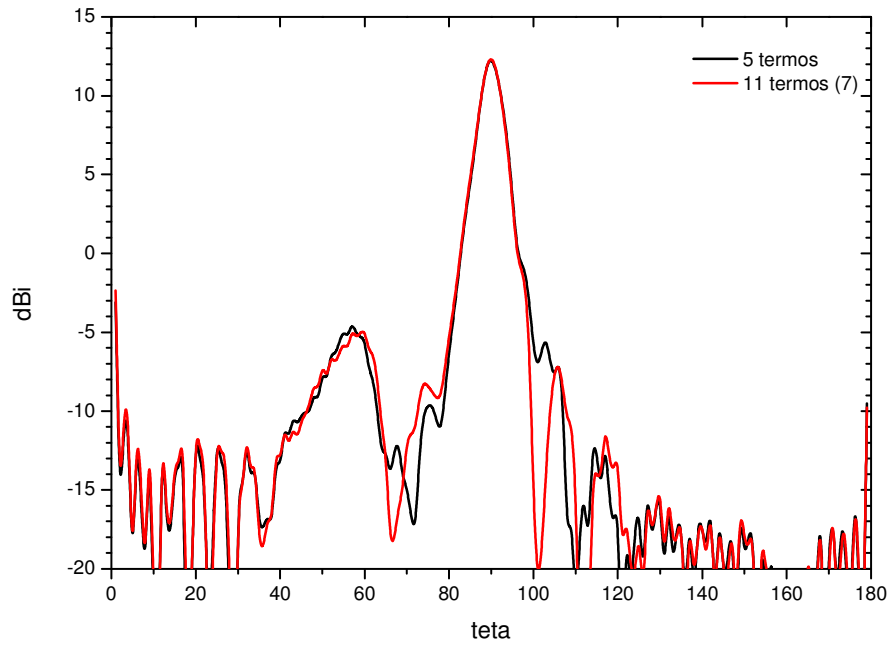


Figura 5.8 – Diagrama de Radiação gerados pela análise PO+CF da otimização para maximizar o ganho com  $V_S$  fixo.

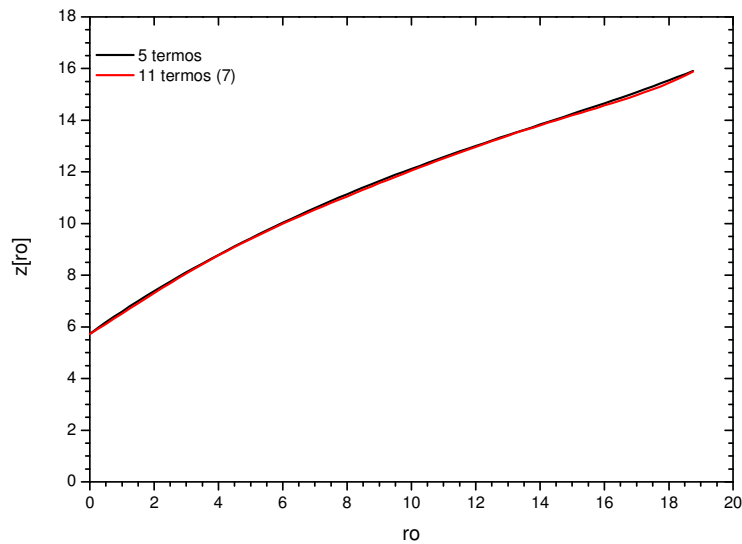


Figura 5.9 – Geratrizes geradas pelas otimizações para maximizar o ganho com  $V_S$  fixo.

Embora a fixação do valor de  $V_S$  tenha contribuído para evitar as anomalias nas otimizações, o caso otimizado com 11 termos da família de 3, apresentou uma geratriz com regiões de sombra, além de apresentar um ganho irreal causado pelo deslocamento da borda da superfície no sentido positivo de  $z$  acarretando no aumento da abertura ( $W_A$ ), conforme ilustrada na Figura 5.10, onde vários trechos estão bloqueados.

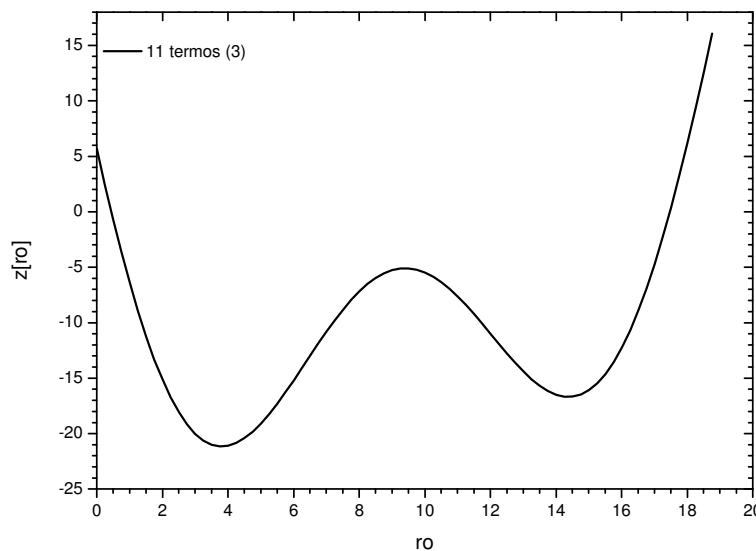


Figura 5.10 – Geratrizes geradas pelas otimizações para maximizar o ganho com  $V_S$  fixo, com discrepâncias.

Para ter controle da abertura ( $W_A$ ) durante o processo de otimização, de modo similar a fixação do  $V_S$  será, também, controlado o ponto da borda do refletor. A Tabela 5.4 mostra os melhores resultados encontrados com  $V_S$  e  $W_A$

. Com a fixação de  $V_S$  e  $W_A$  nenhuma das otimizações entre as famílias apresentaram anomalias, porém devido à restrição de oscilação nas extremidades da superfície acarretou por se limitar a maximização do ganho, ficando abaixo do ganho encontrado na etapa que não se fixou as extremidades da superfície. Os diagramas de radiação e as superfícies geradas são ilustradas nas Figuras 5.11 e 5.12, respectivamente.

Tabela 5.4- – Resultado das otimizações realizadas na antena refletor com radiação omnidirecional na busca de maximizar o ganho com  $V_S$  e  $W_A$  fixos.

$\delta_\delta(\text{família})$	$W_A (\lambda)$	$V_S (\lambda)$	$G_{\max} (\text{dBi})$
5_5	10.18	5.72	12.36
7_3	10.15	5.72	12.39
11_3	10.15	5.72	12.45

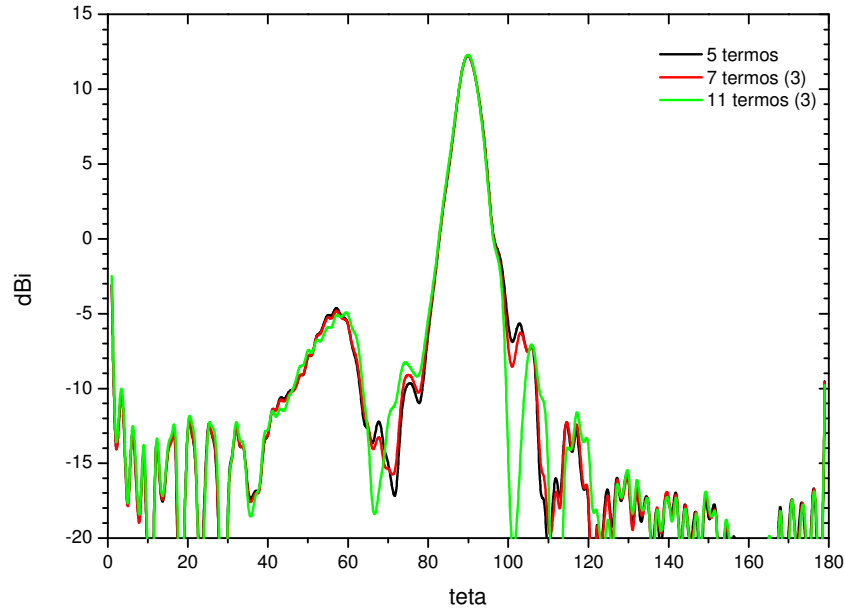


Figura 5.11 – Diagrama de Radiação gerados pela análise PO+CF da otimização para maximizar o ganho com  $V_S$  e  $W_A$  fixos.

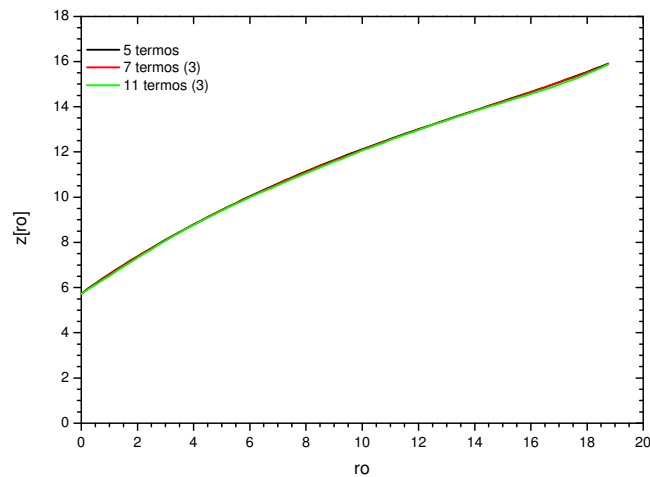


Figura 5.12 – Superfícies geradas pelas otimizações para maximizar o ganho com  $V_S$  e  $W_A$  fixos.

### 5.2.1

#### Antenas refletoras omnidirecionais com diagrama do tipo cossecante ao quadrado no plano vertical

Exemplos de antenas omnidirecionais de um e dois refletores com diagramas cossecante ao quadrado são mostradas em [27,33], respectivamente. Neste trabalho o algoritmo de otimização será aplicado para modelar o refletor a fim de produzir diagrama de cossecante ao quadrado. Como solução inicial para o processo de otimização será utilizado a geratriz parabólica com máximo deslocado, como apresentado na seção anterior, onde o máximo ocorre em  $93^\circ$  e a especificação da cossecante ao quadrado é definida entre  $93^\circ$  e  $135^\circ$ , conforme ilustrado na Figura 5.13.

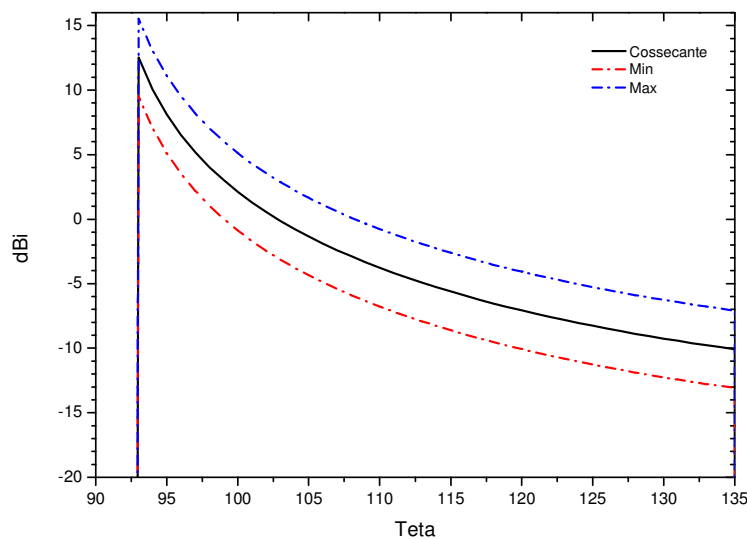


Figura 5.13 – Perfil de ganho dado pela função cossecante ao quadrado com os limites.

Para modelar o refletor utilizou-se uma função objetivo similar à utilizada no modelamento do caso da antena do CBERS, abordado no Capítulo 3, adotando limites mínimo e máximo de  $\pm 3$  dB, mostrados na Figura 5.13.

Na busca do número mínimo da Série de Fourier que atendesse as especificações de cobertura dado perfil tipo cossecante ao quadrado, chegou-se a 9 termos.

Partindo da solução com 9 termos, repetiu-se o processo acrescentando gradativamente dois termos a cada nova otimização. Os resultados são ilustrados através de seus diagramas de radiação mostrados na Figura 5.14.

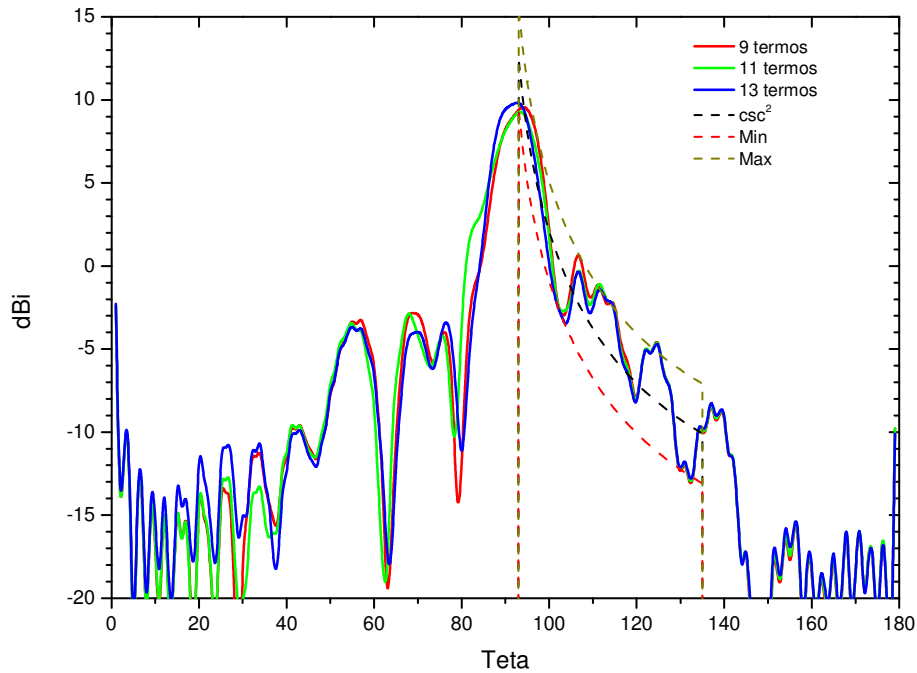


Figura 5.14 – Diagramas de radiação gerados pela análise (PO+CF) com 9,11 e 13 termos na Série de Fourier.

Observando a Figura 5.14 pode-se notar que as otimizações com 9, 11 e 13 termos na Série de Fourier atingiram o resultado esperado, distribuindo a energia na área de interesse seguindo o decaimento imposto pela função da cossecante ao quadrado. Entretanto, a Figura 5.15, onde é realizado um destaque na área de interesse pode-se constatar que em todas as otimizações há uma redução do ganho máximo de 12 dB para em torno de 9.5dB, fato esperado, devido a distribuição da energia ao longo do decaimento imposto pela cossecante ao quadrado. Outro fato a se mencionar é extrapolação dos diagramas gerados por 9 e 11 termos em alguns pontos, assim o diagrama gerado a partir da otimização com 13 termos se apresenta como o mais adequado dentro da região de interesse.

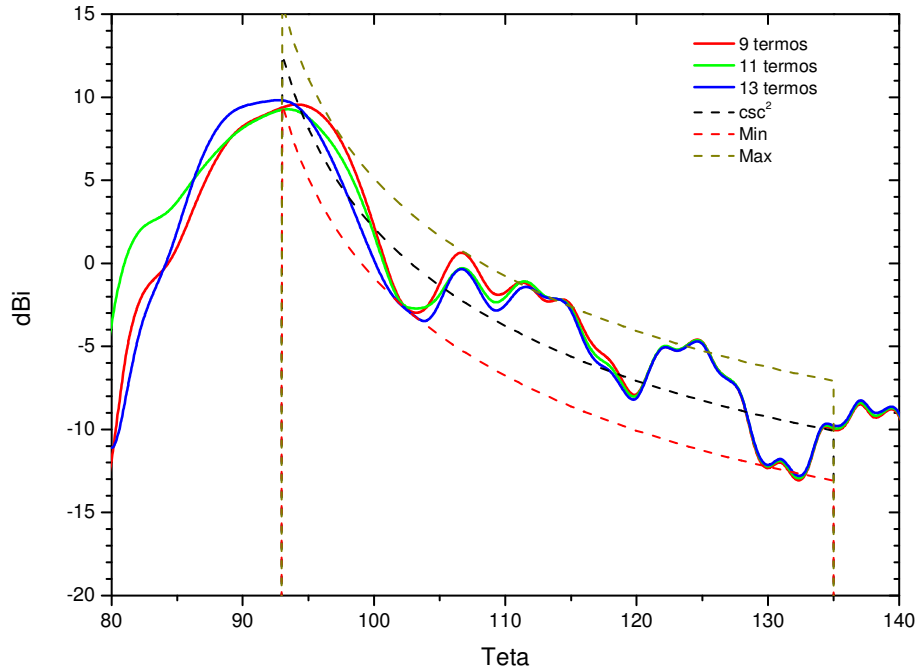


Figura 5.15 – Diagrama de radiação da Figura 5.14 em destaque para a região de interesse na otimização.

As superfícies modeladas com 9, 11 e 13 termos usados na série de Fourier são ilustradas na Figura 5.16.

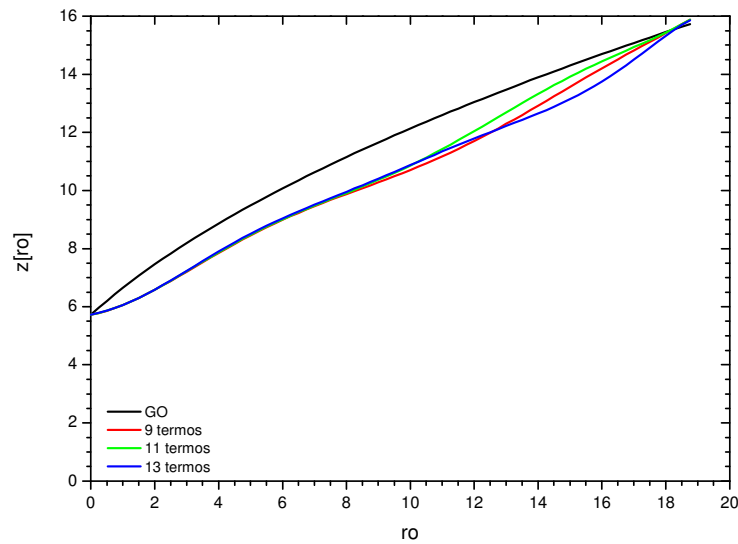


Figura 5.16 – Superfícies modeladas com 9, 11 e 13 termos na Série de Fourier.

### 5.3

#### Caso de antenas refletoras omnidirecional de duplos refletores

Antenas omnidirecionais de duplo refletores são encontradas na literatura [29,31,32] onde são modeladas para maximizar ganho máximo. Nesta seção será utilizado os métodos desenvolvidos no Capítulo 4, para buscar uma otimização dos refletores buscando maximizar o ganho máximo apresentado pela antena refletora de duplos refletores. A antena utilizada neste processo de síntese seguirá as configurações do tipo OADE utilizada no Capítulo 4, conforme ilustrado na Figura 5.17, e seus valores são listados na Tabela 5.5.

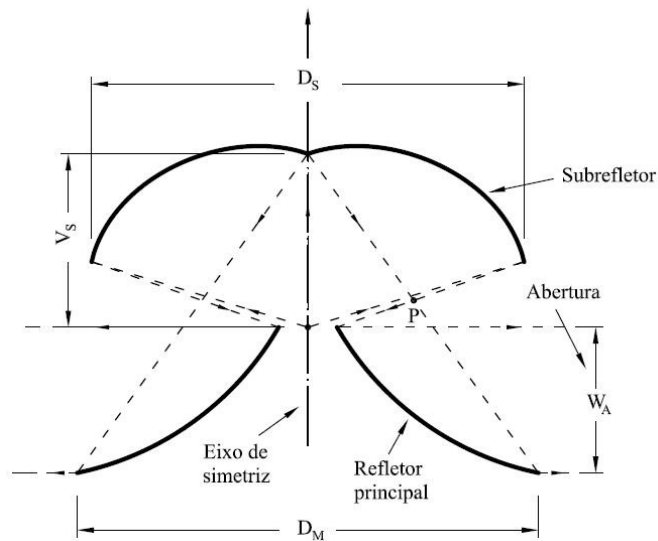


Figura 5.17 – Antena refletora de duplo refletores configurada OADE.

Tabela 5.5 – Configurações da OADE.

Parâmetros	Valores
$D_M$	$24.00 \lambda$
$D_S$	$16.5858 \lambda$
$V_S$	$8.51 \lambda$
$\theta_E$	$55^\circ$
$f$	$3.22035 \lambda$
$W_A$	$10.00 \lambda$
$X_0(P)$	$3.88835 \lambda$
$Z_0(P)$	$2.09352 \lambda$

No processo de síntese primeiramente foi sintetizado somente o refletor principal, no qual foi usado, inicialmente, 3 termos na Série de Fourier, adicionando gradativamente dois termos a cada otimização, chegando a 11 termos na série, assim formando uma família de otimizações. O aumento do número de termos na série não alterou significativamente o ganho na direção de máximo. Na Figura 5.18 são ilustrados os diagramas de radiação dos casos com 3 e 11 termos na série. As superfícies modeladas com 3 e 11 termos na série são ilustradas na Figura 5.19a, e as diferenças entre as geratrizes do refletor principal modelado e a parábola inicial são mostradas na Figura 5.19b, onde se observa as diferenças de  $0.07 \lambda$ , entre a geratriz inicial e otimizada com 3 termos, e  $0.10 \lambda$  entre a geratriz inicial e otimizada com 11 termos.

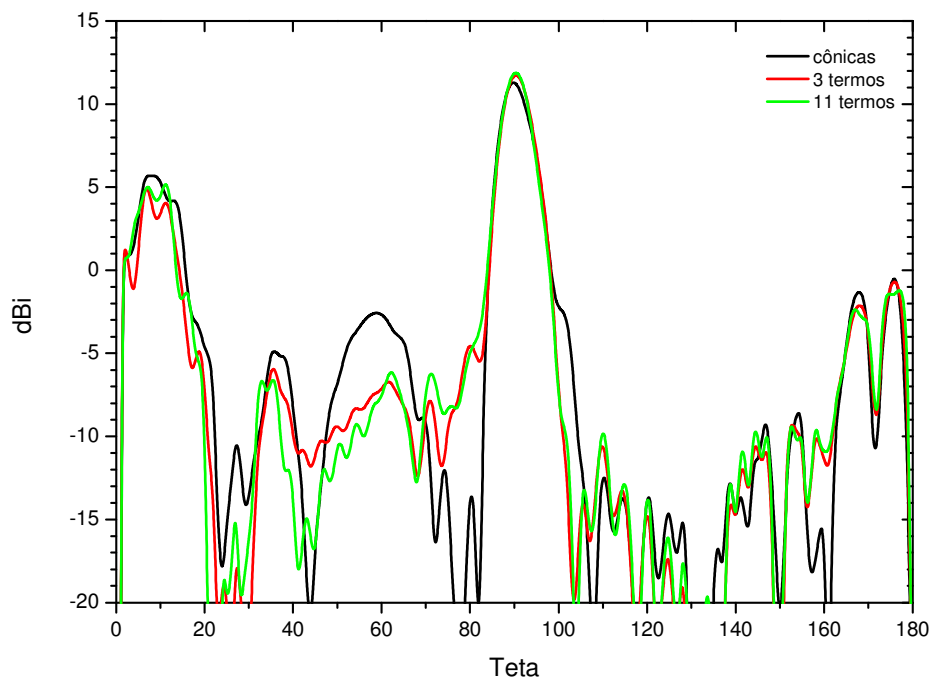


Figura 5.18 – Diagramas de radiação, analisados por PO+CF, das otimizações do refletor principal com 3 e 11 termos na Série de Fourier.



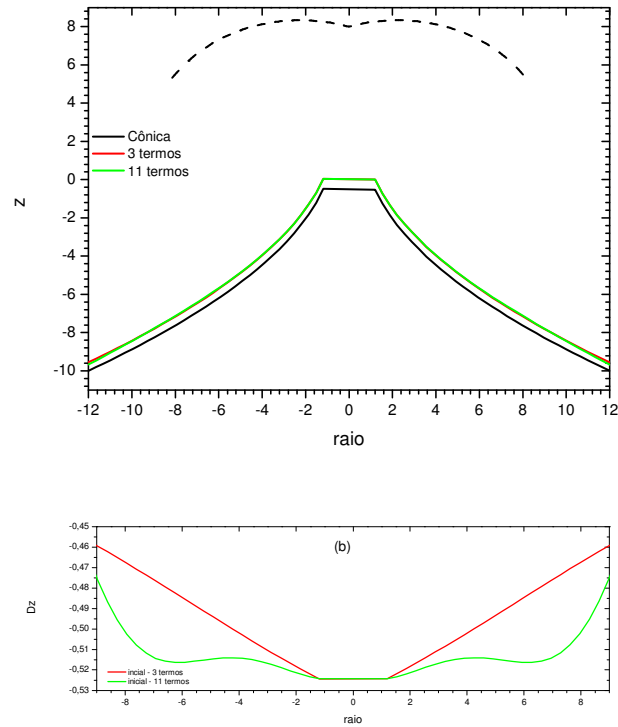


Figura 5.19 – (a) Geratrizes das superfícies dos refletores principais otimizadas com 3 e 11 termos; (b) diferenças entre a geratriz inicial e as modeladas.

No sentido de visualizar o efeito da otimização do refletor principal foi gerado um gráfico que ilustra a distribuição da corrente induzida  $\vec{J}_s$  sobre o refletor principal pela fonte primária, descrita na Seção 4.4, para os casos abordados, conforme é ilustrado na Figura 5.20.

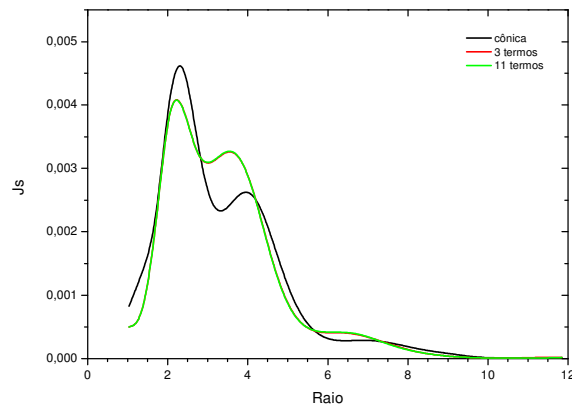


Figura 5.20 – Corrente induzida sobre o refletor principal pela fonte primária 3 e 11 termos na Série de Fourier comparado com sem otimização.

Observa-se que a distribuição de corrente produzida pelas superfícies com geratrizes cônicas confocais está concentrada no externo superior da abertura. Apesar de concentrada na região superior, o modelamento do refletor a redistribuiu a energia sobre abertura, trazendo como consequência o aumento de 0.2 dB no ganho.

Um dos fatores que limita a melhor iluminação da abertura, o diagrama de radiação do sistema subrefletor/alimentador que concentra energia na região superior do refletor principal. Em uma segunda etapa do projeto, o subrefletor será modelado considerando como refletor principal as superfícies dado pela solução de 3 e 11 termos obtidas na primeira etapa. Para o subrefletor, a melhor otimização foi obtido pela utilização de 7 termos na Série de Fourier. Os diagramas de radiação gerados após as otimizações do subrefletor são ilustrados na Figura 5.21.

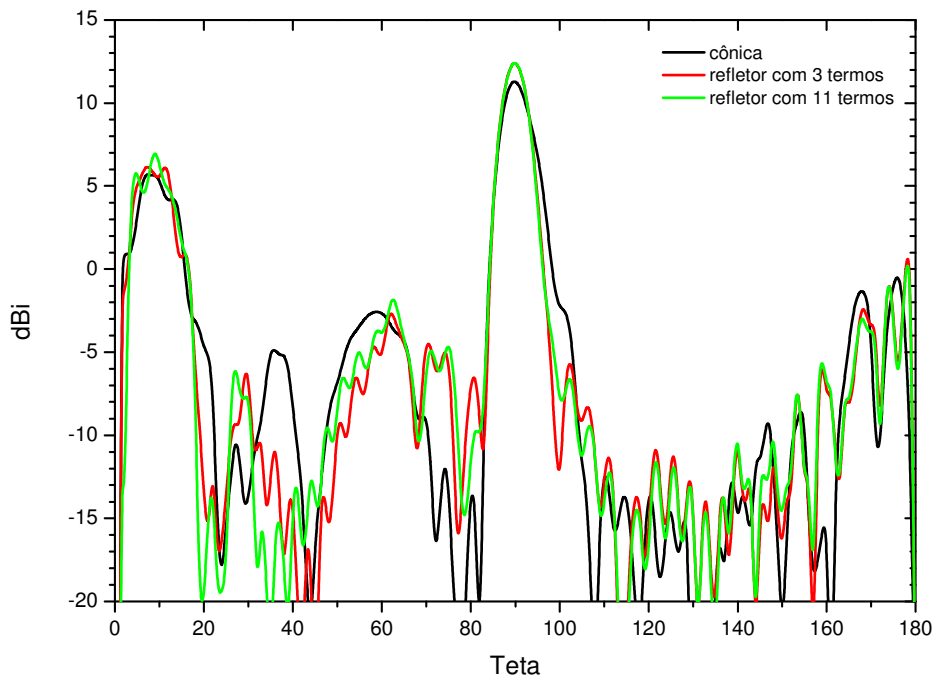


Figura 5.21 – Diagramas de radiação analisados por PO+CF das otimizações do subrefletor com refletores otimizados com 3 e 11 termos.

Observando os diagramas de radiação na Figura 5.21 pode-se notar que com a otimização do subrefletor houve um aumento no ganho máximo. As superfícies dos subfletores modelados são ilustradas na Figura 5.22a e as diferenças entre as geratrizes do subrefletor modelado e a elipse inicial são mostradas na Figura 5.22b, onde se observa as diferenças de  $0.17\lambda$  e  $0.18\lambda$ , entre a geratriz inicial e otimizada com refletor com 3 termos e 11 termos, respectivamente. Verifica-se também a fixação do vértice.

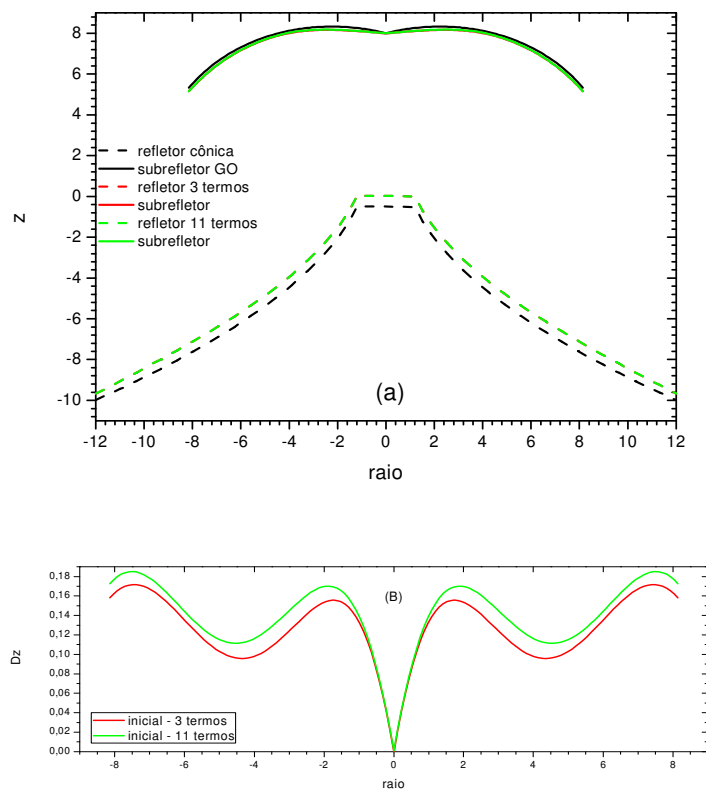


Figura 5.22 – (a) – Geratrizes das superfícies dos subfletores otimizados de acordo com seus refletores principais; (b) diferenças entre o subrefletor inicial e os modelados.

As distribuições das correntes induzidas sobre os refletores principais sofreram alterações devido ao modelamento da superfície do subrefletor. Estas novas distribuições são ilustradas na Figura 5.23, onde se observa um aumento da amplitude da corrente na região da externa do refletor, ou, quando visto do ponto de vista da abertura, um aumento na região inferior desta. Não obstante, estar distante de uma iluminação uniforme da abertura, o modelamento dos refletores

resultou em uma iluminação mais eficiente desta, trazendo como consequência o aumento do ganho.

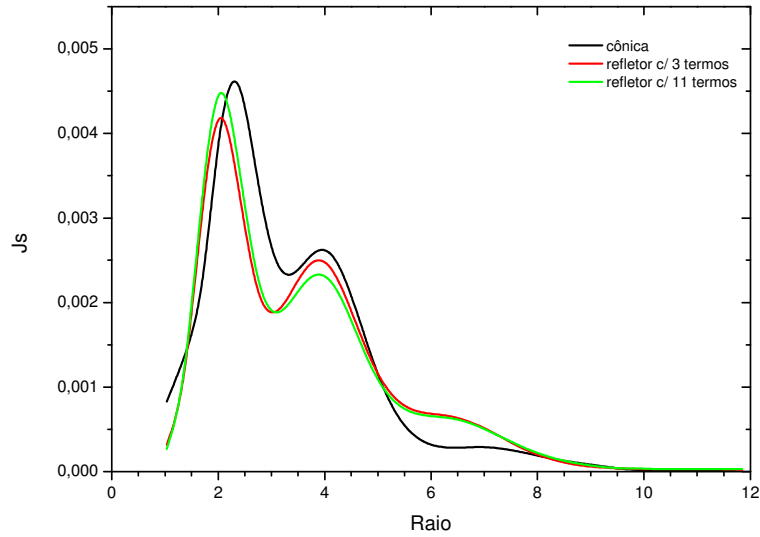


Figura 5.23 – Distribuição das correntes induzidas sobre o refletor principal após as otimizações no subrefletor.