

### 3

## **Síntese de refletores circularmente simétricos alimentados por diagrama com dependência azimutal $n=1$**

### 3.1

#### **Antenas para cobertura uniforme em satélites de baixa órbita: Caso CBERS**

O projeto de antenas para satélites de baixa órbita tem sido abordado em vários trabalhos [4,8,22]. Estes satélites têm órbita elíptica e sua posição em relação a terra é não estacionária. A Agência Espacial Brasileira (AEB) e a Academia Chinesa de Tecnologia Espacial (CAST) estão desenvolvendo um programa de satélite para sensoriamento remoto denominado CBERS (China-Brazil Earth Resources Satellite), Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres. Este programa foi iniciado em 1988 e está sendo desenvolvido em várias etapas. A primeira etapa envolveu o projeto e o lançamento de dois satélites, CBERS 1 e 2. O tempo de vida útil destes satélites é de dois anos, período característico da órbita elíptica de operação, e está situado a aproximadamente 780 km de altura da superfície da terra. Em 2002 foi definida a segunda etapa que estabeleceu como meta a construção de dois novos satélites, CBERS 3 e 4, programados para lançamento em 2008 e 2010, respectivamente. Nesta última geração, estão previstos serviços de comunicação na Banda X, operando entre 8,259 e 8,4 GHz, onde deverá ser utilizada uma de antena refletora embarcada que deverá propiciar a cobertura uniforme da superfície da terra.

Do ponto de vista de um satélite situado a altura de aproximadamente 778 km, a superfície da terra está confinada em um cone com aproximadamente  $62,5^\circ$  ( $\theta_0$ ) de semi-ângulo que tangencia o globo terrestre e com vértice coincidente com a posição do satélite. Entretanto, a distância entre o satélite e as diversas estações terrenas situadas dentro deste cone varia consideravelmente, entre 778 km (H) e aproximadamente 1685 km ( $R_s$ ) na borda da região de cobertura. Para propiciar

um sinal uniforme sobre o cone de cobertura, o ganho desta antena refletora deverá apresentar uma dependência angular que compense os efeitos de atenuação do espaço livre, como mostrado na Figura 3.1.

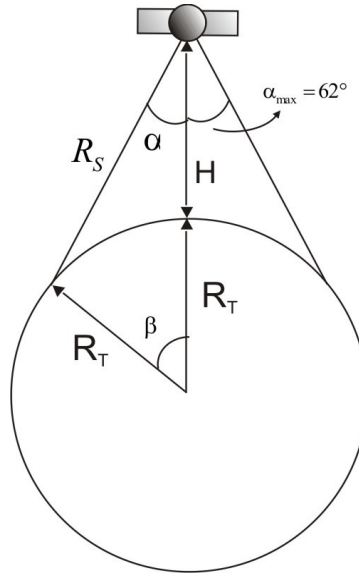


Figura 3.1 – Características da órbita do CBERS.

Considerando o raio da terra  $R_T$  igual a 6378,1 km e a altura do satélite  $H$  igual a 778 km, pode-se estabelecer a seguinte equação para a distância  $R_S$  entre o satélite e uma estação terrena sobre a terra.

$$R_S = (R_T + H) \cos \alpha - \sqrt{(R_T + H)^2 \cos^2 \alpha - (H^2 + 2HR_T)} \quad (3.1)$$

Como o ganho da antena  $G_A(\theta)$  deve compensar a variação da atenuação espacial, pode-se estabelecer a seguinte equação para este ganho,

$$G_A(\alpha) = G_0 \frac{R_S^2(\alpha)}{(H + R_T)^2} \quad (3.2)$$

O parâmetro  $G_0$  é determinado considerando as perdas devido ao transbordamento de energia no refletor e no cone de cobertura, e usualmente é associado a uma eficiência de cobertura da ordem de 25% [23]. A forma do diagrama de radiação a ser utilizada está ilustrada na Figura 3.2, onde o máximo ganho é 6,48 dBi em  $62^\circ$ , ângulo este que representa o apontamento do satélite no

horizonte, maior distância entre satélite e base receptora ( $R_{SMAX}= 4229,7$  km). O menor ganho é especificado em  $-3,62$  dBi a  $\theta=0^\circ$ , nesse ponto o satélite se encontra na menor distância da base receptora ( $R_{SMIN}=778$  km), conforme descrito em [4].

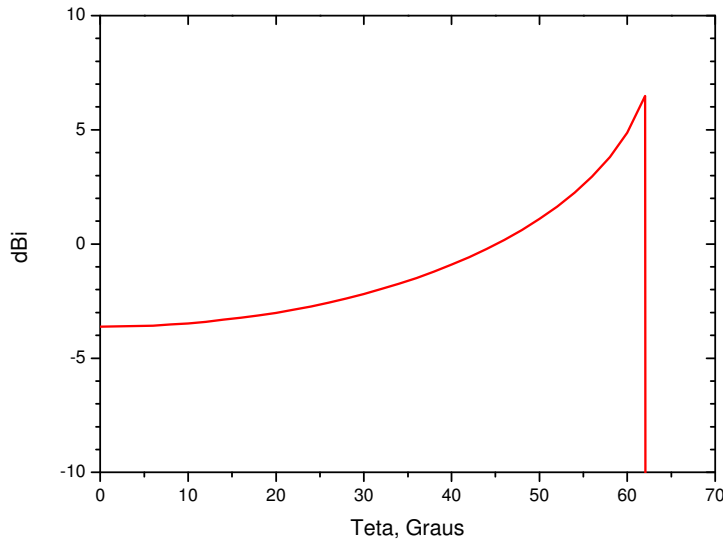


Figura 3.2 – Especificação para o diagrama de radiação para o CBERS.

No projeto da antena descrito em [4], o alimentador é composto de um par de dipolos ortogonais cruzados, com comprimento aproximadamente de  $\lambda/2$ , onde eles se encontram defasados 90 graus entre si. Na Referência, foi utilizado ferramentas de simulação eletromagnética para obter o diagrama de radiação deste alimentador para comparação com o protótipo desenvolvido. Para os exemplos de síntese a serem mostrados neste trabalho, o digrama de radiação do alimentador será aproximado por  $\cos^n \theta$ , com  $n = 4$ .

### 3.2

#### Técnica de otimização de refletores

A partir da definição da superfície refletora e da fonte primária de alimentação pode-se determinar o campo eletromagnético radiado em qualquer ponto do espaço. Em casos de superfícies circularmente simétricas iluminadas por fontes circularmente simétricas com variação azimutal  $n=1$ , pode-se utilizar das

expressões mostradas no Capítulo 2 para se determinar o campo espalhado, sendo que este mantém as características de simetria circular. É importante salientar que as expressões apresentadas são válidas para superfícies refletoras suaves com dimensões maiores que  $5\lambda$  e refletores situados na região de campo distante da fonte.

As Referências [24 - 25] apresentam técnica de síntese de refletores onde a forma das superfícies é modelada para aproximar um diagrama de radiação especificado. Nestes trabalhos, as técnicas são baseadas em algoritmos de otimização e a superfície dos refletores é representada por uma expansão de funções conhecidas e os coeficientes determinados para minimizar uma função objetivo. Esta função é construída a partir das diferenças entre os valores especificados para o diagrama e os obtidos através de cálculo de espalhamento de campo.

Diversos conjuntos de funções têm sido utilizados para representar a superfície no processo de síntese [26]. Nos exemplos a serem mostrados neste trabalho, a representação da geratriz da superfície refletora  $z'(\rho')$  será obtida através da composição de um polinômio do segundo grau e de uma série de Fourier como descrito em (3.3):

$$z'(\rho') = C_z + R_z \left[ (a_0 + a_1\tau + a_2\tau^2) + \sum b_\delta f_\delta(\tau) \right] \quad (3.3)$$

onde

$$\tau = \frac{\pi\rho'}{2R_A}, \quad (3.4)$$

e

$$f_\delta(\tau) = 1, \sin(\tau), \cos(\tau), \sin(2\tau), \cos(2\tau), \sin(3\tau), \cos(3\tau) \text{ para } \delta = 1, 2, 3, 4, 5, \dots \quad (3.5)$$

Para construir a função objetivo, é necessário definir em campo distante um conjunto de M direções, ou estações de amostragem, onde o ganho da antena será calculado e comparado com as especificações para estas direções. Como mencionado anteriormente, as características de simetria da fonte e da superfície geram um diagrama de radiação que apresenta simetria circular e permitem que a

amostragem se concentre ao longo de um plano de  $\phi$  constante. Para assegurar a adequada amostragem do campo distante, a distância entre estes pontos deve satisfazer a taxa de Nyquist que é obtida a partir do diâmetro do refletor em comprimentos de onda, onde a distância angular é definida em radianos [5]:

$$\Delta\theta < \frac{\lambda}{D} \quad (3.6)$$

No caso do CBERS, o objetivo do modelamento é promover uma cobertura uniforme sobre a superfície da Terra fazendo com que o diagrama de radiação da antena aproxime a curva descrita pela Equação (3.1) e mostrada na Figura 3.1. Devido ao diâmetro finito do refletor (60 cm, ou aproximadamente 16,6 comprimentos de onda), além de ajustar o ganho da antena ao diagrama desejado, oscilações no diagrama devem ser esperadas. A função objetivo é construída impondo limites superiores  $G_{MAX}$  e inferiores  $G_{MIN}$  para o ganho calculado, para a antena controlar estas oscilações, como mostrado na Figura 3.3. As duas curvas são geradas a partir da Equação (3.2) e diferem de um fator que define o intervalo dos valores em que o ganho pode variar. Os valores de ganho que estiverem fora destes limites representam um comportamento indesejado e, conseqüentemente devem ser evitados na busca da solução ótima. Para o caso do CBERS, foi utilizada a seguinte Função Objetivo:

$$F_{obj}[a_i, b_\delta] = \sum_m^M [W_m \Delta G_m[a_i, b_\delta]]^2 \quad (3.7)$$

$$\Delta G = \begin{cases} 0 & \text{se } G_{MAX} > G_S > G_{MIN} \\ G_{MIN} - G_S & \text{se } G_S < G_{MIN} \\ G_S - G_{MAX} & \text{se } G_S > G_{MAX} \end{cases} \quad (3.8)$$

onde  $W_m$  é o peso atribuído ao resíduo na direção  $m$ .

Para a minimização da função objetivo, será utilizada a rotina BCONF do IMSL que emprega técnicas de quasi-Newton para determinar a seqüência iterativa de otimização [27].

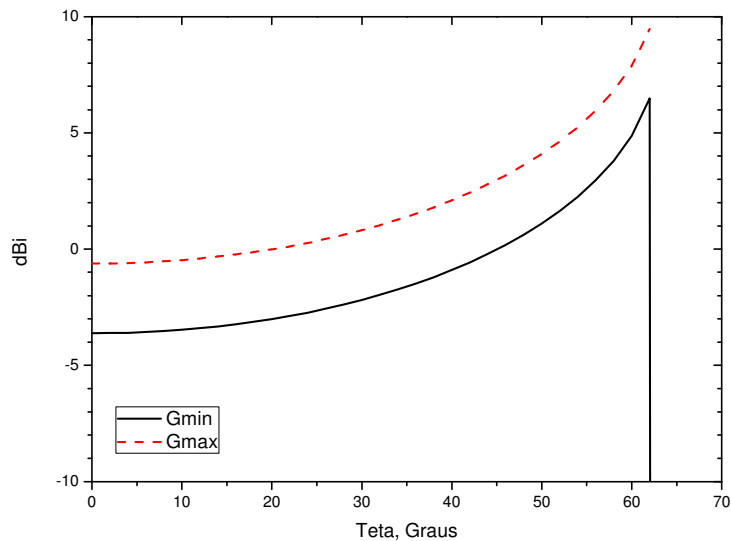


Figura 3.3 – Limites mínimo e máximo das especificação para o diagrama de radiação para o CBERS com faixa de 3 dB.

### 3.3

#### Solução inicial via síntese ótica

A convergência do processo iterativo para um mínimo global depende da escolha da solução utilizada para inicializar a seqüência iterativa. Soluções obtidas através de métodos de síntese de refletores baseadas nas aproximações da Ótica Geométrica (GO) têm sido utilizadas com sucesso para inicializar a otimização, assegurando a convergência e o controle da distribuição de energia na frente do refletor para evitar o bloqueio por parte do alimentador.

Na referência [8], o autor utiliza as aproximações da ótica geométrica para desenvolver técnicas de síntese de refletores para controlar o diagrama de radiação. Para as configurações de antena com um único refletor, este tipo de abordagem supõe que os raios emitidos na direção  $\theta'$  por uma fonte pontual são refletidos no campo distante na direção  $\theta$  de forma a redistribuir a energia no espaço e obter o ganho especificado para esta antena, como ilustrado na Figura 3.4.

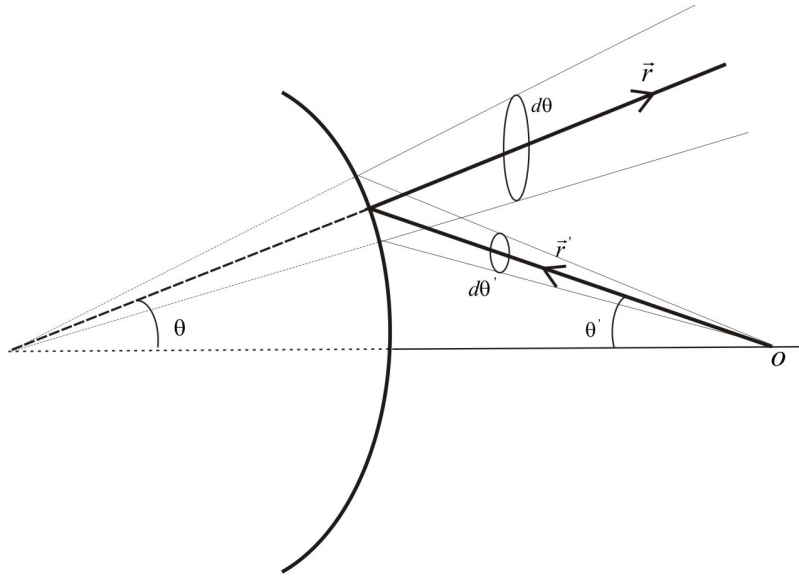


Figura 3.4 – Relação de  $\theta(\theta')$  e o princípio da conservação de energia no interior do tubo de raios.

A relação entre a direção  $\theta'$  do raio incidente no refletor e a direção  $\theta$  do raio refletido é obtida impondo o princípio da conservação de energia no interior de um tubo de raios, o que permite definir uma função  $\theta(\theta')$ :

$$\int_0^{\theta_F} I(\theta') \sin \theta' d\theta' = Q \int_0^{\theta_0} G_A(\theta) \sin \theta d\theta \quad (3.9)$$

onde  $I(\theta')$  é o ganho do alimentador circularmente simétrico,  $G_A(\theta)$  é o ganho especificado em campo distante e  $Q$  uma constante de normalização.

A forma do refletor é obtida associando a relação entre o raio incidente e o refletido e a Lei de Snell para a reflexão sobre a superfície do refletor. Para ilustrar de forma sucinta esta técnica ótica, será utilizada a notação desenvolvida por Westcott et al [8], que representa os refletores através de uma função escalar  $L(\eta)$  onde  $\eta = \cot(\theta'/2)$ , sendo  $\theta'$  a direção do raio incidente:

$$\vec{r}'(\eta) = \left[ (2\eta)\hat{i}_\rho + (\eta^2 - 1)\hat{i}_z \right] e^{L(\eta)} \quad (3.10)$$

O vetor  $\vec{r}$  descreve os pontos sobre o refletor, como indicado na Figura 3.4. Utilizando esta notação, o autor em [8] mostra que a relação entre a direção do raio incidente e do refletido é descrita por:

$$L_{\eta} = \frac{2}{\xi - \eta} \quad (3.11)$$

onde  $\xi = \cot(\theta/2)$  e  $L_{\eta}$  é a derivada de primeira ordem de  $L$  em relação a  $\eta$ . Assim, conhecida a função  $\theta(\theta')$  é possível através da integração de  $L_{\eta}$  determinar  $L(\eta)$ .

Para ilustrar os resultados obtidos por este tipo de técnica, foi realizada a síntese de refletor para atender as especificações de campo distante do CBERS, conforme descrito na Equação (3.11). Para representar o alimentador, foi utilizado o modelo  $I(\theta') = \cos^N \theta'$ , sendo o valor de  $N$  igual a 4, como sugerido em [4]. A fonte localiza-se sobre o foco do refletor que por sua vez coincide com a origem do sistema de coordenadas adotado. Foi utilizado software existente para sintetizar duas superfícies e os parâmetros de entrada foram ajustados para que os refletores apresentem diâmetros de 60 e 50 cm, respectivamente. A Figura 3.5 ilustra a geratriz das superfícies sintetizadas. Considerando o sistema operando na frequência de 8.3 GHz, o diagrama de radiação destas antenas foi calculado (via PO+CF) e estão mostrados nas Figuras 3.6.

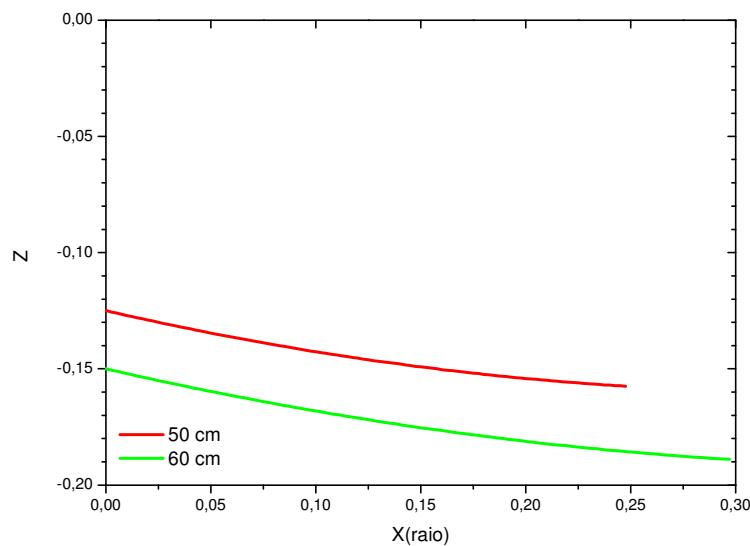


Figura 3.5 – Geratrizes dos refletores sintetizados pela GO para 50 e 60 cm.



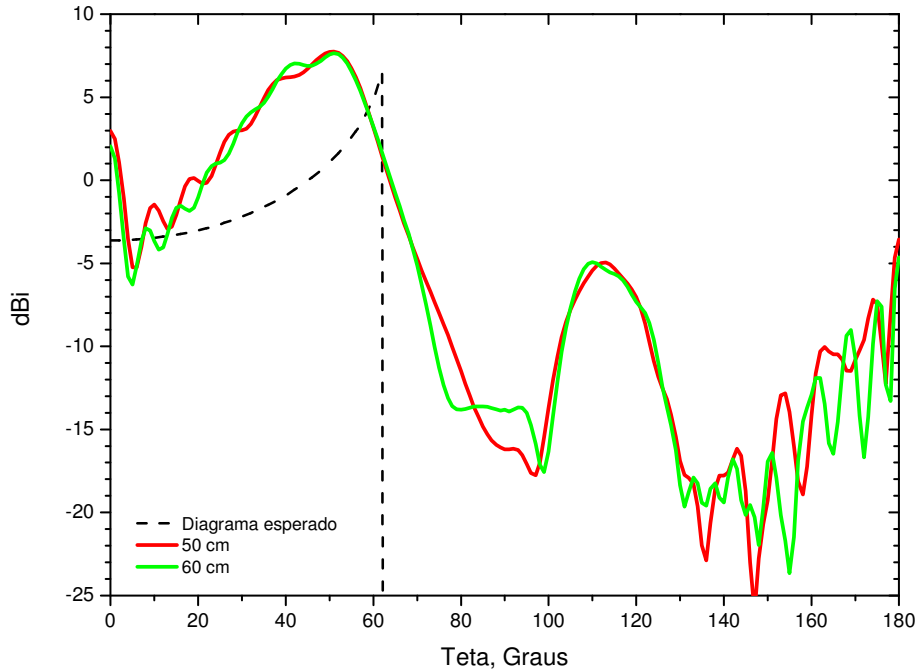


Figura 3.6 – Diagrama de radiação do refletor sintetizado pela GO.

Como observado, apesar do diagrama apresentar o crescimento do ganho com o ângulo  $\theta$ , são observadas discrepâncias maiores que 7dB em relação as especificações, além de uma forte queda na intensidade na borda, para ambos diâmetros. Esta discrepância é esperada devido às limitações nas dimensões do refletor e das aproximações na técnica de síntese.

### 3.4

#### Modelamento de refletores para cobertura do CBERS

Nesta seção serão descritos as diversas etapas da aplicação da técnica de síntese do projeto da antena refletora para o satélite CBERS. A técnica descrita anteriormente será utilizada para explorar o desempenho da antena considerando refletores com 60 e 50 cm de diâmetro, e diversos limites para a oscilação do diagrama. Nos diversos exemplos a serem mostrados será discutido o desempenho do processo de síntese, considerando o número e a distribuição das  $M$  estações de

amostragem em campo distante, o número de termos  $\delta$  da Série de Fourier utilizado para descrever a superfície do refletor, Equação (3.3), a distribuição de pesos  $W_m$  utilizada na construção da função objetivo e a atenuação de borda do alimentador definida pelo parâmetro  $n$ , na Equação (2.1) do modelo de alimentação.

Para o caso de uma antena refletora com 60 cm de diâmetro e operando na frequência de 8,3 GHz, a taxa amostragem de Nyquist requer que as estações de amostragem estejam a uma distância angular menor que  $3,5^\circ$ . Nos exemplos a serem mostrados serão utilizadas 32 estações de observação distribuídas uniformemente pelo intervalo de interesse,  $0^\circ$  a  $62^\circ$ , ou seja, um espaçamento angular de  $2^\circ$ .

Como mencionado anteriormente, é natural que devido às limitações nas dimensões do refletor apareçam oscilações no diagrama da cobertura. No primeiro exemplo a ser mostrado considerar-se que o limite máximo para o ganho ( $G_{MAX}$ ) esteja a 3 dB acima da curva de ganho mínimo ( $G_{MIN}$ ), onde a curva de  $G_{MIN}$  é curva mostrada anteriormente na Figura 3.2. O número de termos na Série de Fourier deve propiciar o grau de liberdade necessário para convergência do esquema iterativo. Se por um lado, o uso de um número maior de termos propicia um maior grau de liberdade na busca da solução ótima, este aumento implica em aumento no tempo de processamento numérico de cada iteração tendo em vista que a cada passo são calculadas as derivadas numéricas da função objetivo em relação a cada variável a ser otimizada. Desta forma, a determinação no número adequado de funções na expansão é essencial para o uso eficiente da técnica de síntese. O espaçamento entre estações determinado pelo diâmetro do refletor em comprimento de onda e o número estações de amostragem são parâmetros indicativos do limite superior do número de termos na série. Para verificar o comportamento da síntese em função do número de termos, foram utilizados inicialmente  $\delta=16$  termos na série coincidentes com aproximadamente o número de comprimentos de onda que expressam o diâmetro do refletor. Tomando este resultado com referência, foram gerados novos refletores para diversos valores de  $\delta$  entre 5 e 16 para observar a relação da forma da superfície e o número de termos. Na construção da Função Objetivo foi utilizada uma distribuição de pesos uniforme,  $W(m)=1$ , para todos os resíduos. Estes refletores sintetizados foram analisados via técnica baseada em PO+CF e os diagramas de radiação estão

mostrados nas Figuras 3.7 e 3.8 para antenas operando na frequência de 8,3 GHz. As geratrizes dos refletores estão mostradas nas Figuras 3.9 e 3.10.

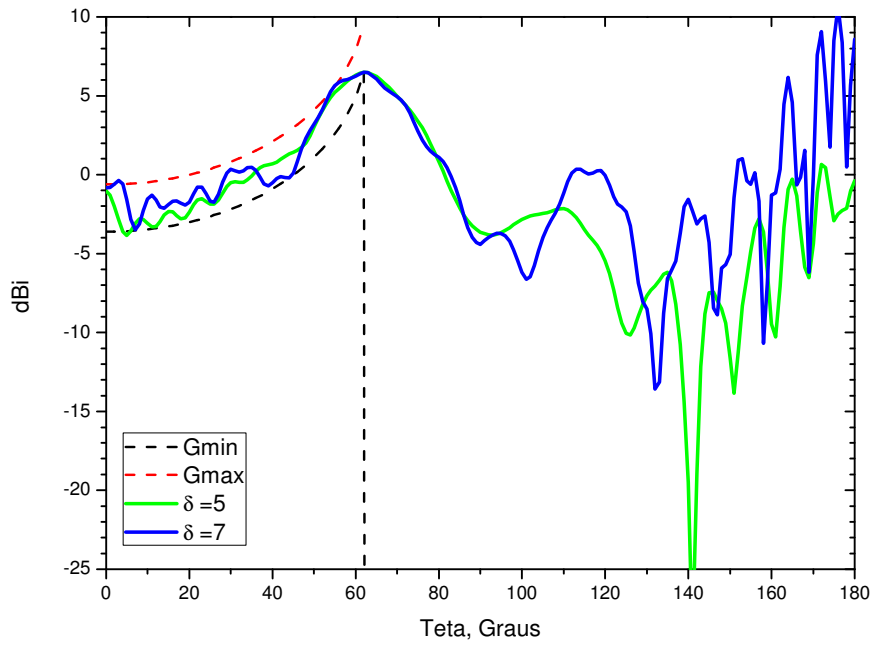


Figura 3.7 – Diagramas de radiação sintetizados pela PO+CF com 5 e 7 termos na Série de Fourier.

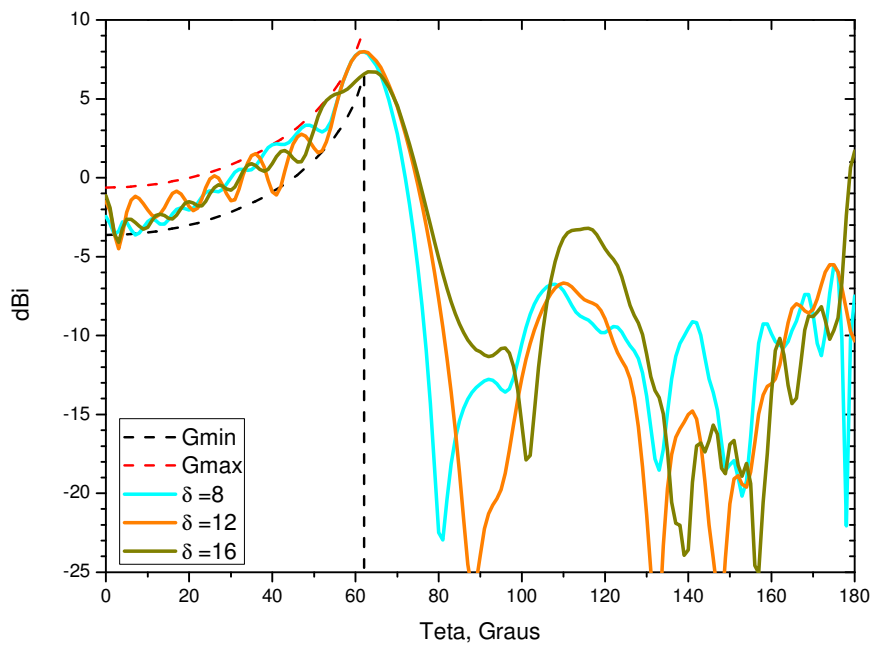


Figura 3.8 – Diagramas de radiação sintetizados pela PO+CF com 8,12 e 16 termos na Série de Fourier.

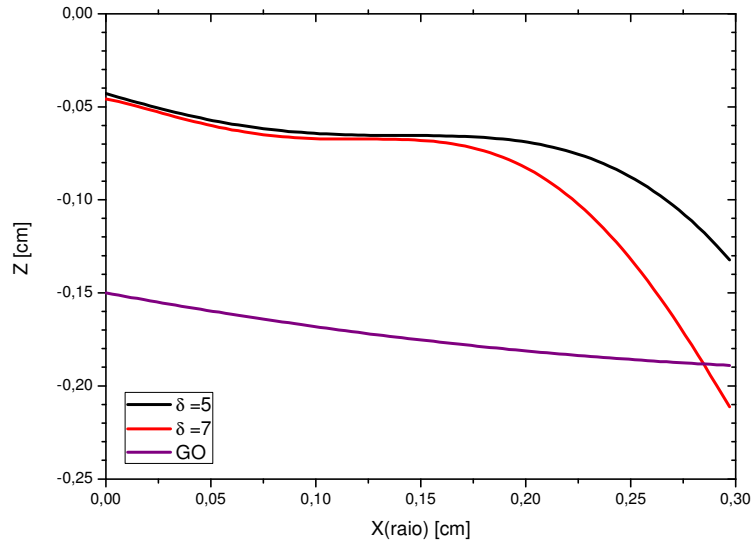


Figura 3.9 – Geratriz dos refletores sintetizados com 5 e 7 termos na Série de Fourier.

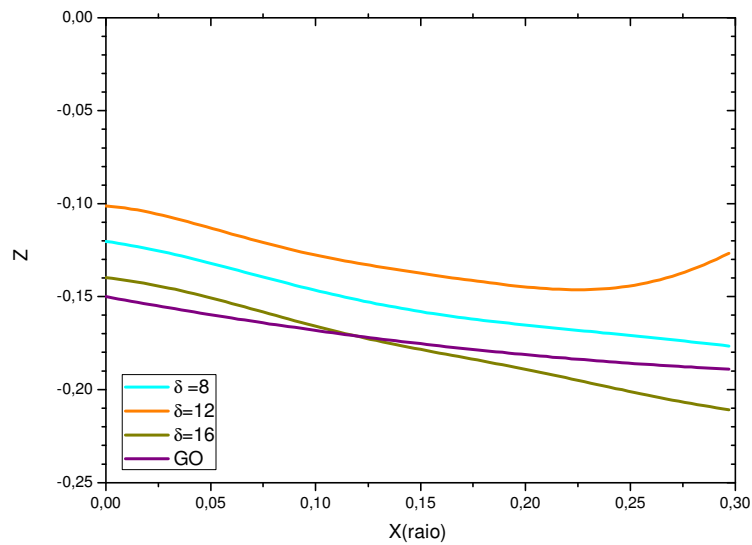


Figura 3.10 – Geratriz dos refletores sintetizados com mais 8 termos na Série de Fourier.

Como observado na Figura 3.7 e 3.8, resultados satisfatórios para os diagramas de radiação na região de cobertura foram obtidos para superfícies otimizadas com mais de 5 termos na série. Entretanto, observa-se que a utilização de um número maior de termos pode resultar na redução das oscilações na região de cobertura e no aumento no decaimento após  $62^\circ$  (“roll-off”). Além disso, observa-se, que a diminuição do número de termos na série na otimização aproxima o refletor da fonte e aumenta as oscilações de curvatura na superfície.

Estes dois aspectos aumentam os efeitos de acoplamento entre alimentador e refletor e da difração no interior da superfície devido ao aumento da curvatura, ambos não considerados nos métodos de análise utilizados para síntese. Em casos como ilustrado na Figura 3.9 a região de borda destas superfícies encontram-se em região de sombra visto do alimentador, ou seja, devido à função implementada não apresentar mecanismo de detecção a erros físicos, como detectar se a superfície se encontra em uma região de sombra a superfície resultante pode apresentar curvaturas inviáveis fisicamente.

Tendo em vista que os diagramas de radiação mostrados na Figura 3.8 ficaram acima da curva de ganho mínimo, um segundo conjunto de refletores foi obtido impondo como limite inferior valores  $G_{MIN}$  para a síntese com 1 dB acima da especificação imposta para o primeiro conjunto, conforme descrito na Figura 3.11. Além de elevar o nível mínimo exigido na região de cobertura, estas especificações têm como objetivo reduzir as oscilações do diagrama entre as curvas limites, impondo, agora, uma diferença de 2 dB entre os níveis máximos e mínimo.

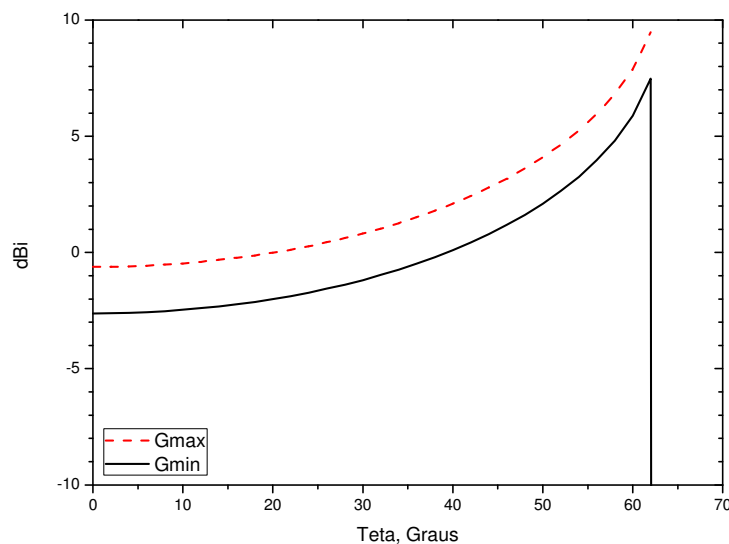


Figura 3.11 – Curvas limites,  $G_{MAX}$  e  $G_{MIN}$ , para diagrama de radiação de cobertura do projeto Cbers.

Os diagramas obtidos para este segundo conjunto de refletores estão mostrados na Figuras 3.12 e 3.13 para diferentes números de coeficientes na Série

de Fourier. As geratrizes geradas pelo nosso conjunto de refletores são ilustradas nas Figuras 3.14 e 3.15.

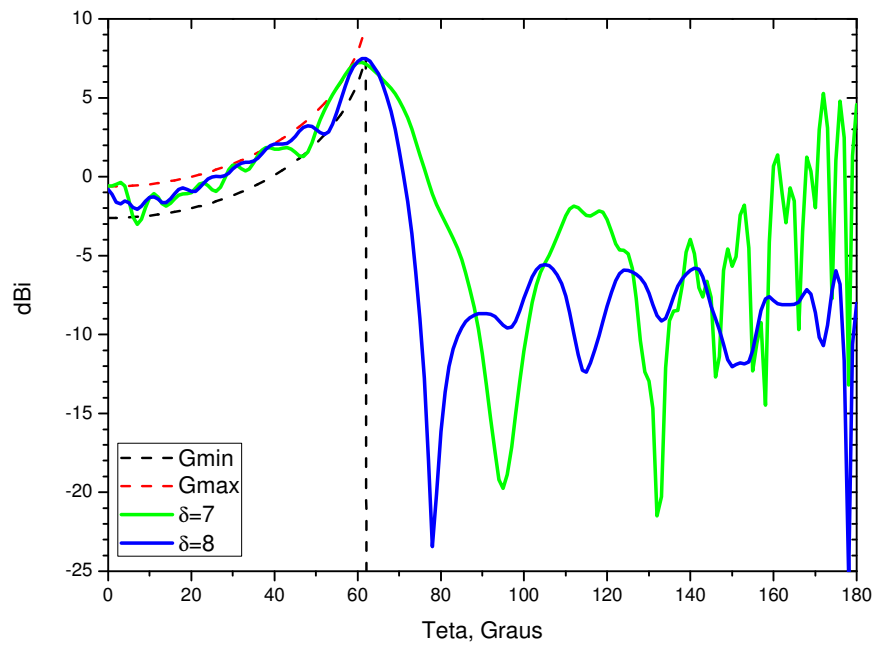


Figura 3.12 – Diagramas de radiação sintetizados pela PO+CF com 7 e 8 termos na Série de Fourier.

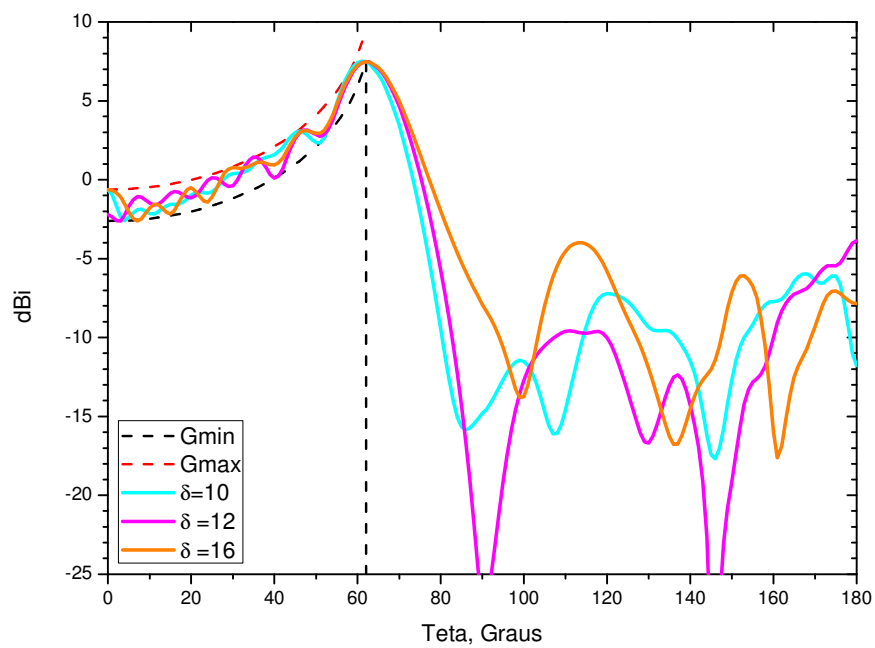


Figura 3.13 – Diagramas de radiação sintetizados pela PO+CF com 10, 12 e 16 termos na Série de Fourier.

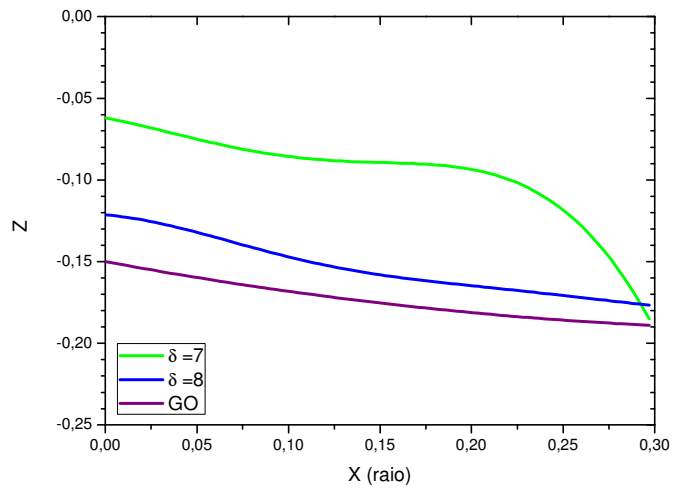


Figura 3.14 – Geratriz dos refletor sintetizados com 7 e 8 termos na Série de Fourier.

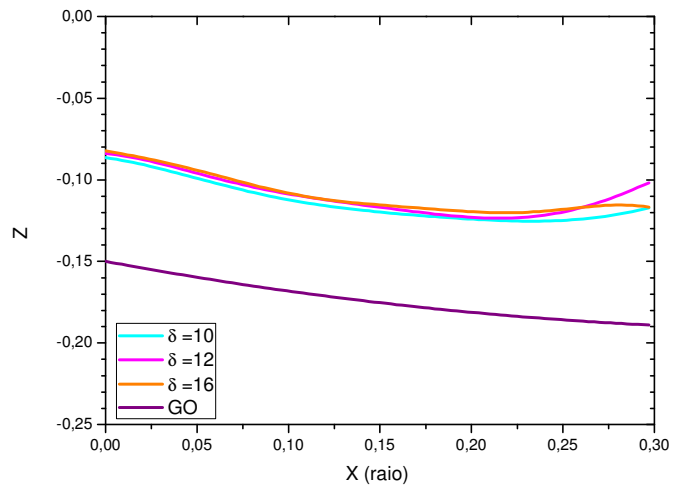


Figura 3.15 – Geratriz dos refletor sintetizados com 10,12 e 16 termos na Série de Fourier.

Comparado com o primeiro conjunto de refletor onde a diferença entre  $G_{MAX}$  e  $G_{MIN}$  é de 3 dB, observa-se que subiu para  $\delta=8$  o número mínimo de termos da série necessários para obter a convergência do processo de otimização. O diagrama para  $\delta=7$  apresenta limitações para obter o nível mínimo de ganho próximo ao centro e na borda da região de cobertura, conforme observado no destaque da Figura 3.16.

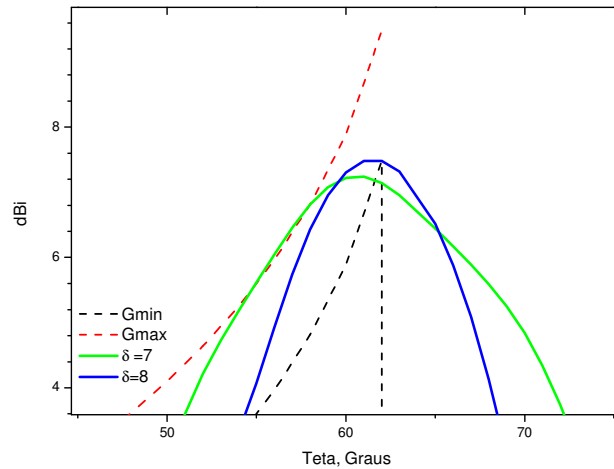


Figura 3.16 – Destaque no diagrama de radiação do sintetizado com 7 termos na Série de Fourier.

Para explorar a síntese, um terceiro conjunto de refletores foi sintetizado para curvas de GMAX e GMIN com 1 dB de diferença pela redução do nível do limite superior, quando comparado às especificações do segundo conjunto. Os resultados dos diagramas de radiação e geratrizes das superfícies são mostrados nas Figuras 3.17 e 3.18, respectivamente. Onde se observa que o número mínimo de termos na Série de Fourier necessários para convergência é 9.

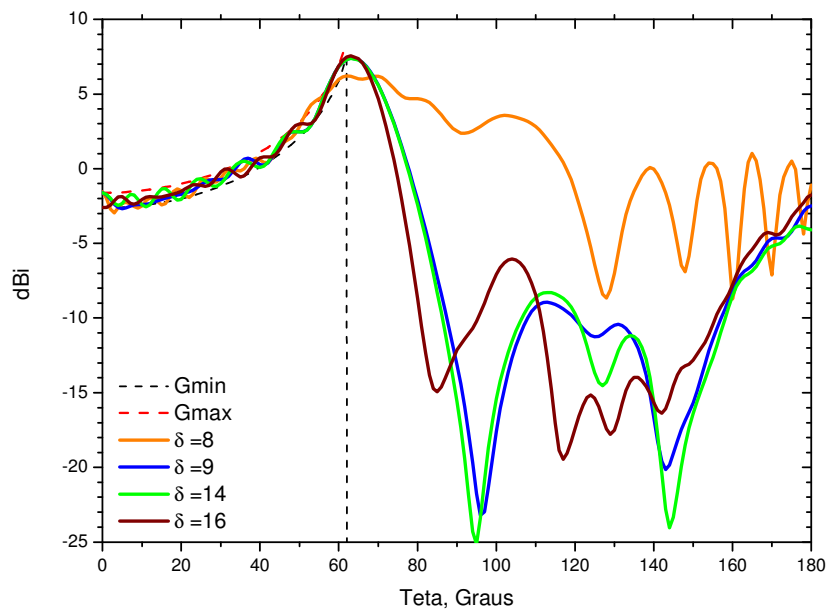


Figura 3.17 – Diagramas de radiação sintetizados pela PO+CF com diferentes números de termos na Série de Fourier.



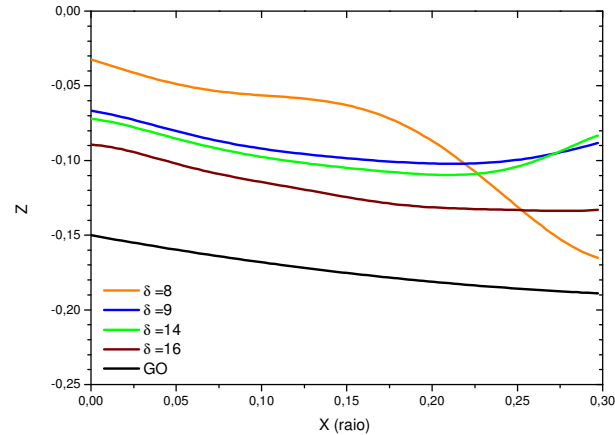


Figura 3.18 – Geratriz dos refletores sintetizados com 8 a 16 termos na Série de Fourier.

Numa segunda etapa deste estudo, a técnica de síntese será utilizada para projetar a antena refletora para as especificações do CBERS, considerando, agora, uma antena refletora com um diâmetro de 50 cm o que permitiria reduzir o peso a bordo do satélite. Seguindo passos semelhantes as que foram utilizados na etapa anterior, a solução de referência utiliza 14 termos na expansão o que corresponde aproximadamente 14 comprimentos de onda do diâmetro do refletor de 50 cm comprimentos. Para comparação foi realizada a síntese com 16 e 12 termos. Para a frequência de 8,3 GHz, os diagramas de radiação dos três projetos são mostrados na Figura 3.19.

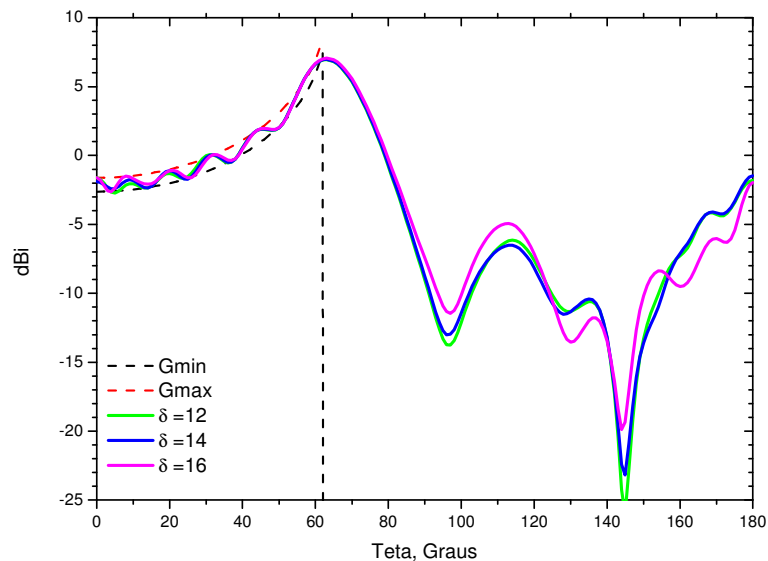


Figura 3.19 – Diagramas de radiação sintetizados pela PO+CF com 12,14 e 16 termos na Série de Fourier para o refletor de 50 cm.

Apesar dos diagramas se acomodarem entre as curvas limites ( $G_{MAX}-G_{MIN}=1$  dB) em quase toda a região de cobertura, eles estão abaixo do limite inferior na borda da cobertura, como mostra a Figura 3.20.

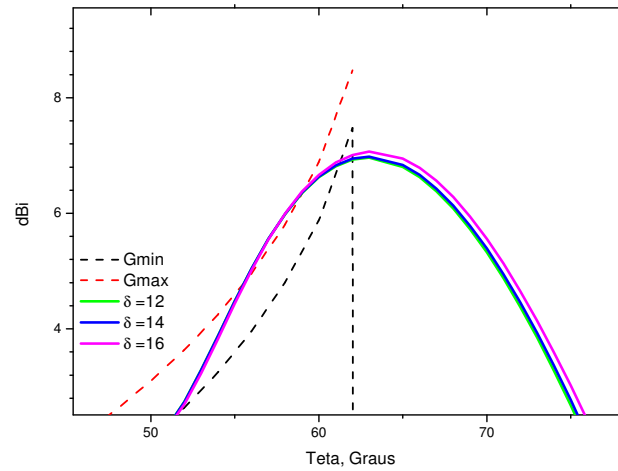


Figura 3.20 – Destaque no diagrama de radiação do sintetizado com 12,14 1 16 termos na Série de Fourier.

Para corrigir o nível de cobertura na borda, as superfícies foram novamente otimizadas, tomando como ponto de partida os resultados anteriores e dobrando o peso do resíduo associado à amostragem na borda da cobertura, em  $\theta=62^\circ$ . Utilizando  $\delta=14$  termos, o diagrama obtido para a antena refletora ao final desta nova etapa está mostrado na Figura 3.21. Como observado, o diagrama satisfaz o nível de cobertura na borda, mas, quando comparado aos resultados do refletor de 60 cm de diâmetro, o decaimento do diagrama (“roll-off”) é menos intenso e os lóbulos laterais mais intensos. A geratriz deste refletor é mostrada na Figura 3.22.

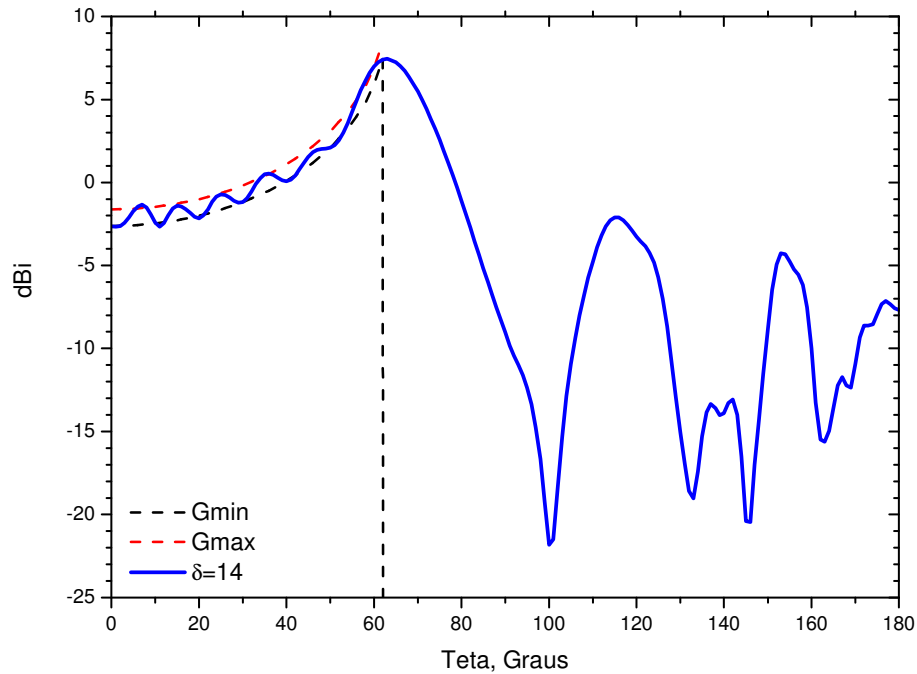


Figura 3.21 – Diagramas de radiação sintetizados pela PO+CF com 14 termos na Série de Fourier e aplicação dos pesos  $W_m$ .

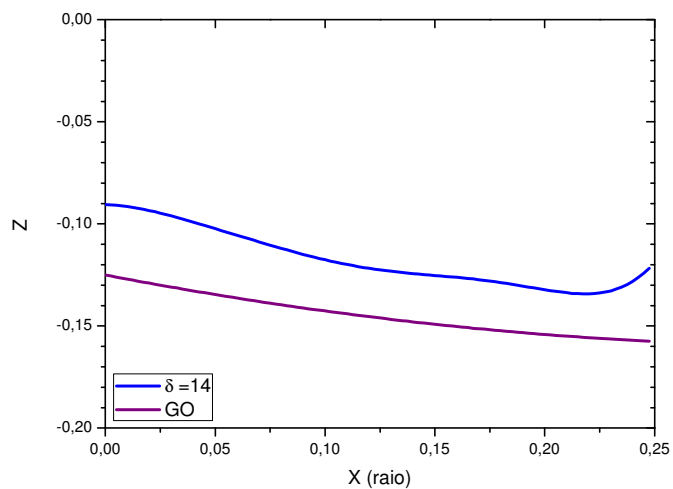


Figura 3.22 – Geratriz dos refletores sintetizados com 14 termos na Série de Fourier.

Após analisar todos os processos de síntese desenvolvidos nesta seção podemos listar alguns aspectos interessantes. Como as particularidades que estão envolvidas na técnica de síntese adotada neste trabalho, onde passamos pela

escolha que atendesse a taxa de Nyquist nas  $M$  estações de observação; o número limite de termos da Série de Fourier modelando a superfície do refletor para que as especificações do projeto fossem cumpridas; o uso de pesos  $W_m$  associados a cada estação de observação para que em casos como da antena refletora de 50 cm de diâmetro a síntese com 14 termos pudesse atender as especificações após a resintetização.

Estes aspectos abordados na utilização da técnica de síntese desenvolvida neste Capítulo, onde demonstramos que uma antena mesmo com 10 cm menor atendeu as especificações, reduzindo o peso abordo do satélite. Fatores esses que consideramos de fundamental relevância no projeto de um satélite.