

4 Cornetas Setoriais com Lentes

As características de radiação das cornetas setoriais no plano H são, em sua essência, determinadas pelas dimensões da abertura e pelo ângulo de abertura ψ da corneta, mostrados na Figura 4.1. A obtenção de diagrama com largura de feixe mais estreita no plano H dependerá do aumento das dimensões da abertura, sendo esta largura limitada ao ângulo ψ . Esta limitação decorre da frente de onda cilíndrica que incide sobre a abertura gerar uma variação de fase cilíndrica sobre o plano desta. Conseqüentemente, a diminuição da largura do feixe ou o aumento do ganho da corneta exigirá a utilização de cornetas setoriais com ângulo ψ menores e mais compridas, aumentando as dimensões e, conseqüentemente o custo de fabricação do dispositivo. Como alternativa, pode-se utilizar uma lente metálica na abertura para corrigir esta variação de fase aproximadamente quadrática, pois a lente apresenta pequeno bloqueio a passagem da onda, não afetando significativamente o comportamento da perda de retorno, parâmetro importante no desempenho de antenas.

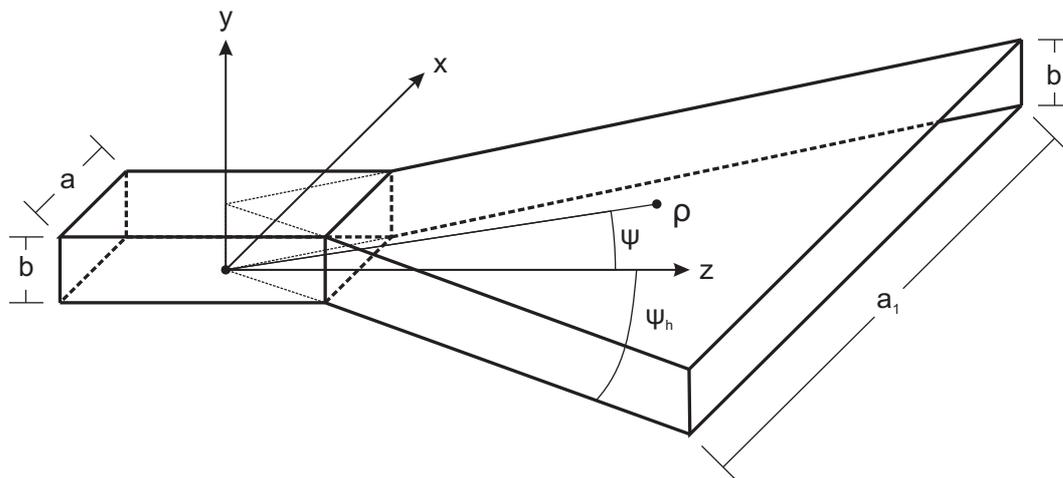


Figura 4.1: Geometria da Corneta Setorial Plano H.

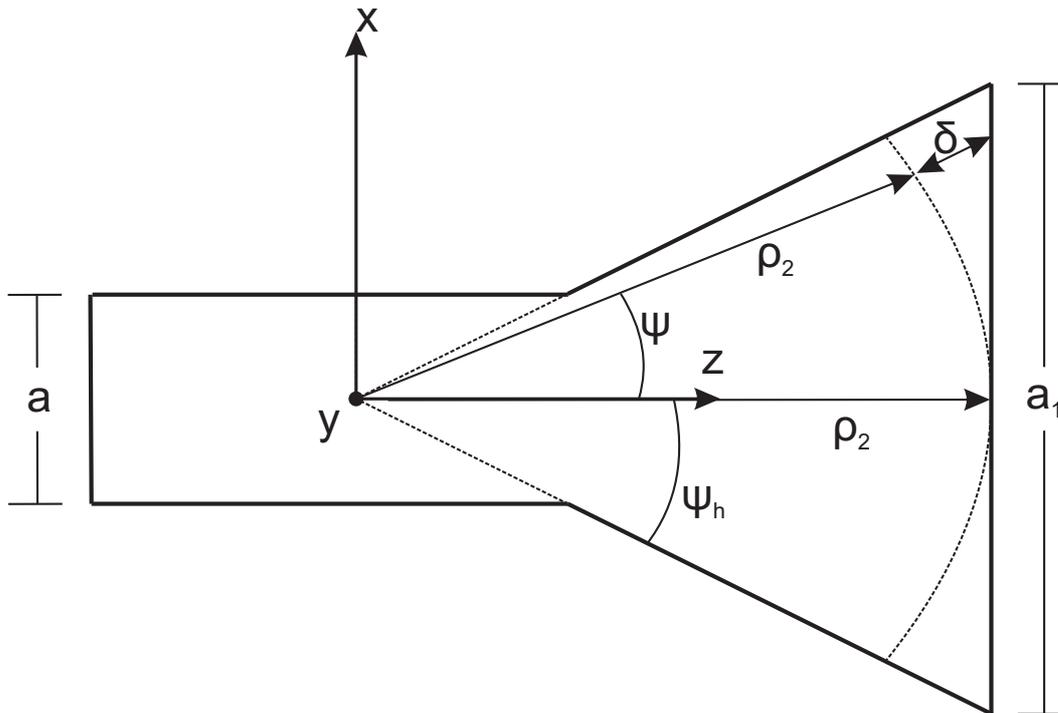


Figura 4.2: Vista no Plano H.

Neste capítulo serão consideradas técnicas de projeto e análise de cornetas setoriais no plano H com lente acoplada à abertura. Os resultados obtidos com uma análise simples serão confrontados com resultados obtidos por técnica rigorosa de predição eletromagnética no domínio do tempo (CST-*Computer Simulation Technology*).

4.1

Campos na Abertura das Cornetas Setoriais no plano H

Conforme ilustrado na Figura 4.1, a corneta setorial no plano H consiste de um guia de onda de seção transversal retangular que sofre uma transição para uma abertura com seção transversal relativamente maior com relação ao guia retangular. Desta forma, realiza-se uma transição, geralmente suave, de uma onda propagando em um guia de onda para uma onda propagando no espaço livre. A suavidade desta transição depende do ângulo ψ da corneta.

A linha tracejada na Figura 4.2 ilustra a frente de onda cilíndrica na abertura plana quando iluminada pelo modo cilíndrico fundamental TE_{10} que se propaga na corneta. Ao longo da abertura da corneta a fase será diferente em cada ponto em virtude da onda ter percorrido diferentes distâncias do centro de fase a abertura, sendo esta diferença dada por δ .

Os campos da corneta setorial são obtidos como descrito em [1] e são expressos como funções de onda cilíndricas TE e TM . Para o caso em que o

guia de onda alimentador da corneta é excitado pelo modo dominante TE_{10} e o comprimento ρ_2 da corneta é maior que a dimensão da abertura a_1 , e podemos aproximar os campos na abertura pelo campo do modo TE_{10} cilíndrico. Desta forma, desconsiderando-se os modos de alta ordem e o modo refletido, as componentes do campo na abertura podem ser aproximadas por:

$$E_x = H_y = 0 \quad (4-1)$$

$$E_y(x) = E_0 \cos\left(\frac{\pi}{a_1}x\right) e^{-jk\delta(x)} \quad (4-2)$$

$$H_x(x) = -\frac{E_0}{\eta} \cos\left(\frac{\pi}{a_1}x\right) e^{-jk\delta(x)} \quad (4-3)$$

$$\delta(x) = -\rho_2 + \rho_2 \sqrt{\left[1 + \left(\frac{x}{\rho_2}\right)^2\right]} \quad (4-4)$$

onde E_0 é uma constante. Estas expressões são similares as dos campos de um guia retangular excitados pelo modo dominante, sendo o fator exponencial complexo inserido para representar a frente de onda cilíndrica associada ao modo TE_{10} . A variação de fase é um fator que limita o desempenho da corneta, pois reduz o ganho com conseqüente alargamento do diagrama de radiação, aumento do nível dos lóbulos laterais e preenchimento dos nulos do diagrama no plano H .

4.2 Síntese de Lentes Metálicas

Lentes metálicas podem ser projetadas de forma simples pela metodologia apresentada por Matsushima [14]. A técnica requer que a frente de onda incidente na superfície da lente seja cilíndrica, fato que permite a simplificação do problema para duas dimensões. Adicionalmente, o campo elétrico da onda incidente deve ser paralelo as placas, e a correção de fase na abertura da lente é efetuada pela variação do comprimento das placas ou do espaçamento entre placas adjacentes.

Estas lentes podem ser utilizadas para correção da variação de fase $\delta(x, y)$ na abertura de cornetas setoriais no plano H , sendo facilmente projetadas pela técnica de traçado de raios utilizada neste trabalho. Embora a proposta original de Matsushima seja para focalização do feixe em um ponto, sua formulação pode ser generalizada para obtenção de fase uniforme na abertura da lente.

É importante salientar que esta técnica aproximada despreza os efeitos de reflexão e deslocamento de fase discutidos anteriormente no Capítulo 3.

Nesta seção serão abordados dois tipos de lente para correção de fase na abertura de cornetas setoriais no plano H . No primeiro caso as placas têm comprimento uniforme e espaçamentos variáveis, sendo denominada lente plana ou lente com índice de refração variável. No segundo caso as placas têm comprimentos distintos e espaçamentos uniformes, sendo denominada lente côncava ou lente com índice de refração uniforme.

Lentes com índice de refração variável

Para a geração de uma frente de onda plana na abertura de uma corneta setorial no plano H pode-se utilizar uma lente plana composta de placas metálicas paralelas, como mostrado na Figura 4.3. Estas placas metálicas possuem idêntico comprimento w e o espaçamento b_i é dimensionado para alterar a velocidade de fase da onda na região entre placas adjacentes (ou alterar o índice de refração equivalente) e produzir uma onda equifásica na nova abertura da corneta ou na saída da lente. Como a frente de onda cilíndrica incidente sobre a entrada da lente é simétrica em relação ao plano yz , a lente metálica corretora de fase deverá ser, também, simétrica em relação a este plano, sendo composta de dois conjuntos idênticos de N placas, simetricamente dispostas em relação ao plano yz .

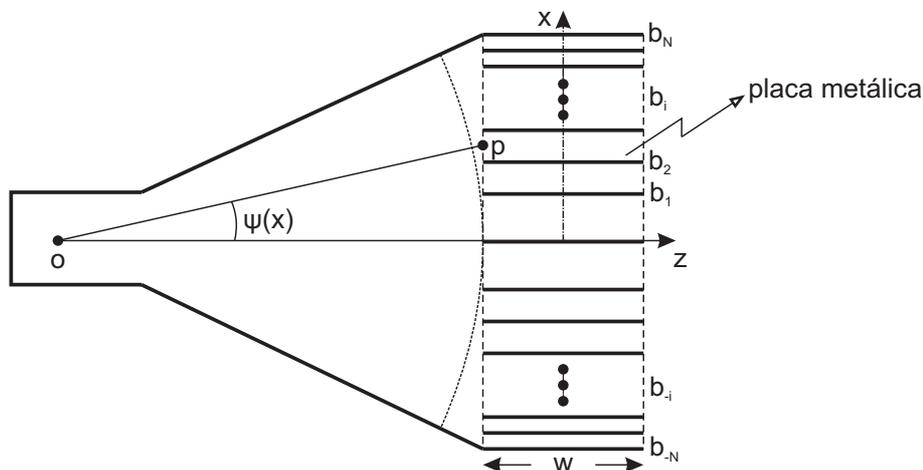


Figura 4.3: Geometria para Lente Plana.

Para o dimensionamento da lente pode-se supor a incidência de um raio sobre a estrutura e impor que o comprimento óptico entre os pontos O e F seja constante, ou um valor múltiplo do comprimento de onda para todos os percursos, como ilustrado na Figura 4.4. O raio incide obliquamente sobre a lente em um ponto x , com uma inclinação $\psi(x)$, segue paralelamente ao

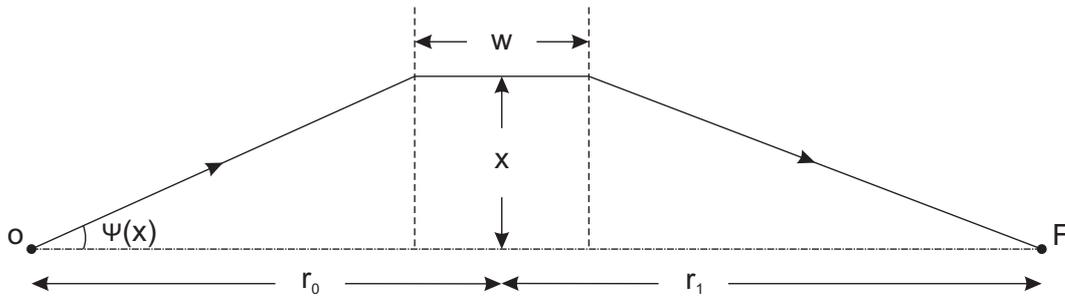


Figura 4.4: Traçado de Raios Lente Plana.

eixo z no interior da lente, emerge em sua abertura e incide sobre o ponto F . Supondo que o caminho óptico para o raio sobre o eixo z seja conhecido, através da definição dos parâmetros r_0 , r_1 , w e $n(0)$, os raios que passam pela lente em um ponto x deverão percorrer o mesmo caminho, o que permite estabelecer a seguinte igualdade:

$$r_0 + r_1 + [n(0) - 1]w = \sqrt{\left(r_0 - \frac{w}{2}\right)^2 + x^2} + \sqrt{\left(r_1 - \frac{w}{2}\right)^2 + x^2} + n(x)w \quad (4-5)$$

onde o lado esquerdo da equação representa o caminho óptico do raio sobre o eixo, e o lado direito representa o caminho para o raio que passa no ponto x . A reorganização da Equação 4-5 permite obter a seguinte expressão para $n(x)$.

$$n(x) = n(0) - 1 - \frac{1}{w} \left[\sqrt{\left(r_0 - \frac{w}{2}\right)^2 + x^2} + \sqrt{\left(r_1 - \frac{w}{2}\right)^2 + x^2} - r_0 - r_1 \right] \quad (4-6)$$

Embora o índice de refração $n(x)$ seja um valor discreto, ele foi utilizado nas equações 4-5 e 4-6 como uma função contínua de x . A curva de decaimento monotônico dada pela Equação 3-10 pode ser reorganizada como

$$d(x) = \frac{\lambda}{2\sqrt{1 - n(x)^2}} \quad (4-7)$$

representando o espaçamento d entre placas em função deste índice de refração, o que permite determinar a posição b_i das placas a partir da sua discretização. Posicionando-se a placa central b_0 na origem, determina-se o posicionamento das placas consecutivas pelo processo iterativo utilizado em [14] dado por:

$$b_i = b_{i-1} + d \left(b_{i-1} + \frac{d(b_{i-1})}{2} \right) \quad (4-8)$$

As placas são, então, organizadas em um arranjo simétrico como observado na Figura 4.3. Este conjunto permite que concentremos o campo irradiado por uma fonte filamental, localizada em O , em uma linha cáustica no ponto F localizado em $(r_1, 0)$, pela variação do espaçamento d entre as placas.

Embora a formulação descrita anteriormente estabeleça condições para que a onda cilíndrica convirja para uma linha em F , ela pode ser utilizada para a geração de uma frente de raios paralelos com foco no infinito. Podemos estabelecer as condições para a função $n(x)$ através da Equação 4-6 fazendo-se r_1 tender para infinito, o que permite escrever:

$$n(x) = n(0) - 1 - \frac{1}{w} \left[\sqrt{\left(r_0 - \frac{w}{2} \right)^2 + x^2} - r_0 - \frac{w}{2} \right] \quad (4-9)$$

Lentes com índice de refração uniforme

Por outro lado, quando o espaçamento entre as placas é fixo, ou seja, o índice de refração é uniforme, temos uma lente côncava. A Figura 4.5 apresenta a geometria para o conjunto de placas cujo perfil é dado por $-w/2 - p_{0i} \leq x \leq w/2 + p_{1i}$, $x = b_i \equiv (2i - N - 1)d_0/2$, onde p_{0i} e p_{1i} são os incrementos nas direções $-x$ e $+x$ respectivamente.

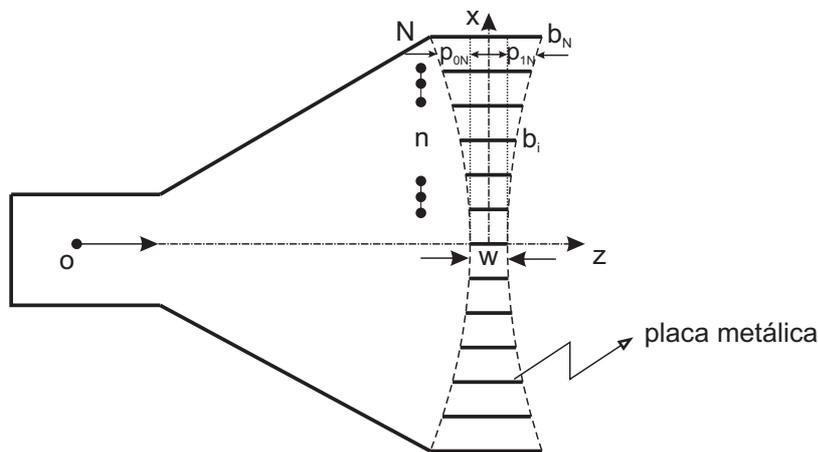


Figura 4.5: Geometria para Lente Côncava.

Diferente do caso anterior, no qual a velocidade de fase da onda era alterado na região entre as placas, o espaçamento d_0 entre placas fixo faz com que a velocidade de fase seja constante. Portanto, a correção do percurso para produzir uma onda equifásica é feita modificando-se o comprimento das placas

w . Com o auxílio da Figura 4.6, a condição de caminho óptico constante pode ser expressa por [14]:

$$r_j - \frac{w}{2} = \sqrt{\left(r_j - \frac{w}{2} - p_j\right)^2 + x^2} + p_j n_0 \quad (4-10)$$

onde $j = 0, 1$. Dessa forma temos:

$$p_j = \frac{r_j - \frac{w}{2}}{1 + n_0} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{1 + n_0}{1 - n_0} \left(\frac{x}{r_j - \frac{w}{2}}\right)^2} \right] \quad (4-11)$$

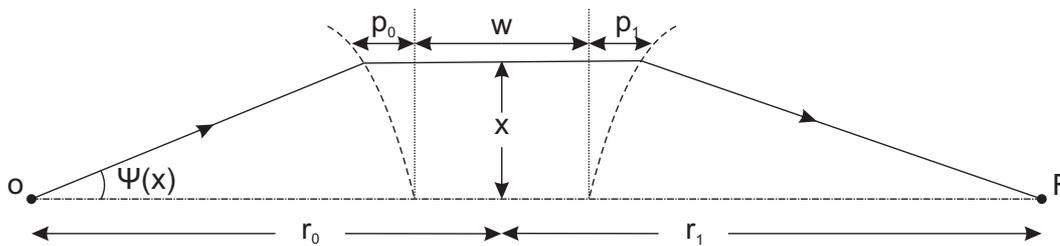


Figura 4.6: Traçado de Raios Lente Côncava.

A lente projetada com a equação 4-11 focaliza o campo no ponto F ao ajustar o percurso nas superfícies de entrada e saída da estrutura, mas podemos efetuar a correção apenas na superfície de entrada dos raios para obtenção de fase uniforme na superfície de saída da lente. Para tanto, utiliza-se $j = 0$, gerando desta forma uma lente plano-côncava, cujo incremento no comprimento das placas com relação ao comprimento da placa central, tomada como referência, é dado por:

$$z(x) = \frac{r_j - \frac{w}{2}}{1 + n_0} - \sqrt{\left(\frac{r_j - \frac{w}{2}}{1 + n_0}\right)^2 - \frac{x^2}{1 - n_0^2}} \quad (4-12)$$

A coordenada x é um valor discreto associado ao índice de refração das placas sendo portanto incrementado a cada passo. Dessa forma, definindo-se o comprimento da placa central, a distância do alimentador e o espaçamento constante entre as placas, determinado pelo índice de refração, obtém-se o perfil desejado.

4.3

Projeto de Cornetas com Lente

Com a utilização da metodologia apresentada na Seção 4.2, esta seção apresenta o dimensionamento de lentes metálicas para equipar a abertura de cornetas setoriais no plano H com o objetivo de otimizar o ganho deste

dispositivo. As lentes propostas reduzem a variação de fase na abertura da corneta setorial ao impor a condição de igualdade do percurso. Entretanto, outros fatores, como os apresentados no Capítulo 3, também devem ser considerados na análise destes dispositivos.

4.3.1

Projeto de Corneta com Lente Plana

A lente dimensionada neste caso deverá equipar uma corneta setorial no plano H com dimensões determinadas para propagação de um único modo, o modo dominante no guia de onda alimentador. Para este exercício dimensionou-se $a = 0,6\lambda$ e $b = 0,4\lambda$, sendo estas dimensões ilustradas na Figura 4.1. As dimensões restantes são $a_1 = 11,25\lambda$, $\rho_2 = 12\lambda$, determinando um ângulo de flare $\psi_h = 25,11^\circ$. Estas dimensões determinam o caso da corneta com lente plana.

A escolha destas dimensões foi um compromisso entre a capacidade de análise com o método utilizado no CST e a minimização da perda de retorno ou do desempenho da corneta. Uma corneta mais longa, porém com um ângulo de flare ψ menor, produziria uma perda de retorno menor, mas acarretaria num custo de memória computacional elevado. Além disto, diminuiria a importância da lente, ou os seus efeitos sobre o ganho. Por outro lado, uma corneta com a mesma abertura, porém mais curta pela utilização de um ψ maior, acentuaria os efeitos difrativos gerado nas paredes das placas metálicas da lente, conforme descrito no Capítulo 3, aumentando a perda de retorno e perturbando o comportamento idealizado pela técnica a ser utilizada.

A corneta proposta foi analisada pela ferramenta de simulação eletromagnética e os resultados para região de campo distante são apresentados na Figura 4.7, onde podemos observar o diagrama de radiação nos planos principais. Foi obtido um ganho de 11,6 dBi para o lóbulo principal, enquanto o ângulo de meia potência, nos planos principais E e H , foram de 89° e 22° , respectivamente. Ainda é possível, com o auxílio da simulação efetuada, observar o comportamento do campo eletromagnético no interior da corneta. A Figura 4.8 ilustra o comportamento da componente normal do campo eletromagnético em seu interior, onde a intensidade das cores indica os pontos de máxima e mínima intensidade da frente de onda. Podemos também observar a variação de fase na abertura da corneta setorial, como previamente discutido, indicando a incidência de uma frente de onda aproximadamente cilíndrica. Nas bordas da abertura, regiões de baixa intensidade de campo, observa-se uma distorção acentuada da frente de onda, indicando a presença de campos difratados na

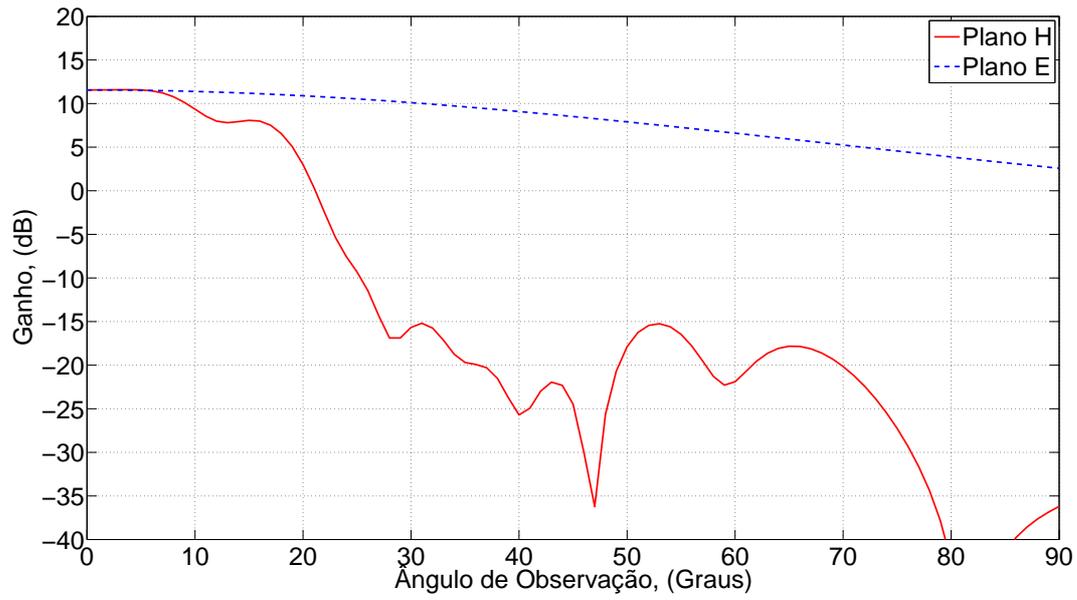


Figura 4.7: Diagrama de Radiação da Corneta - Exemplo I.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0821487/CA

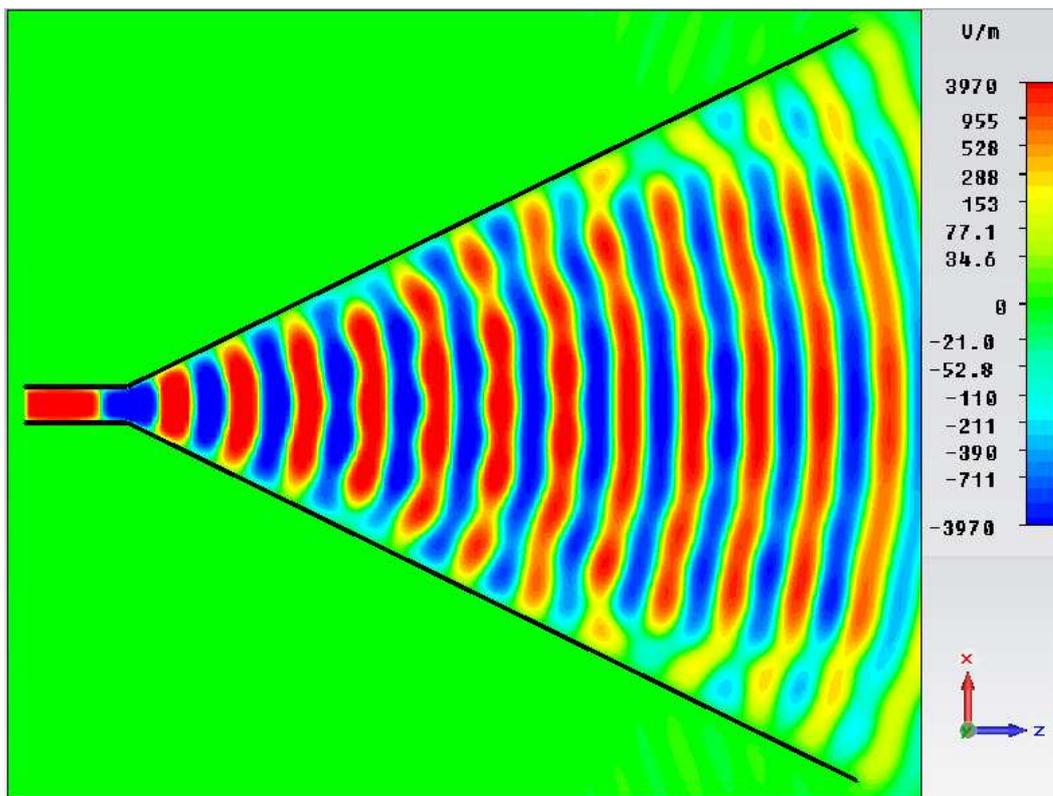


Figura 4.8: Distribuição de Campo no Interior da Corneta.

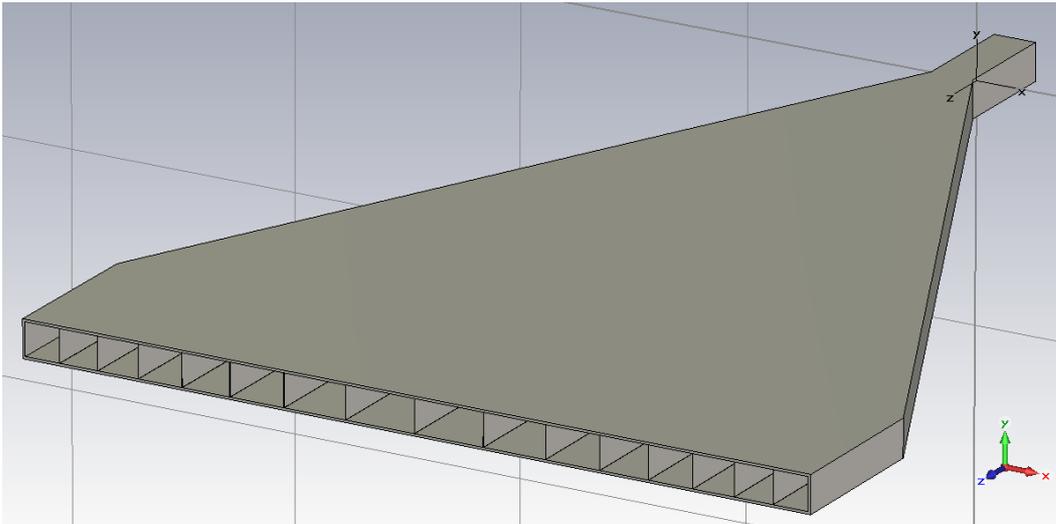


Figura 4.9: Corneta Setorial com Lente Plana.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0821487/CA

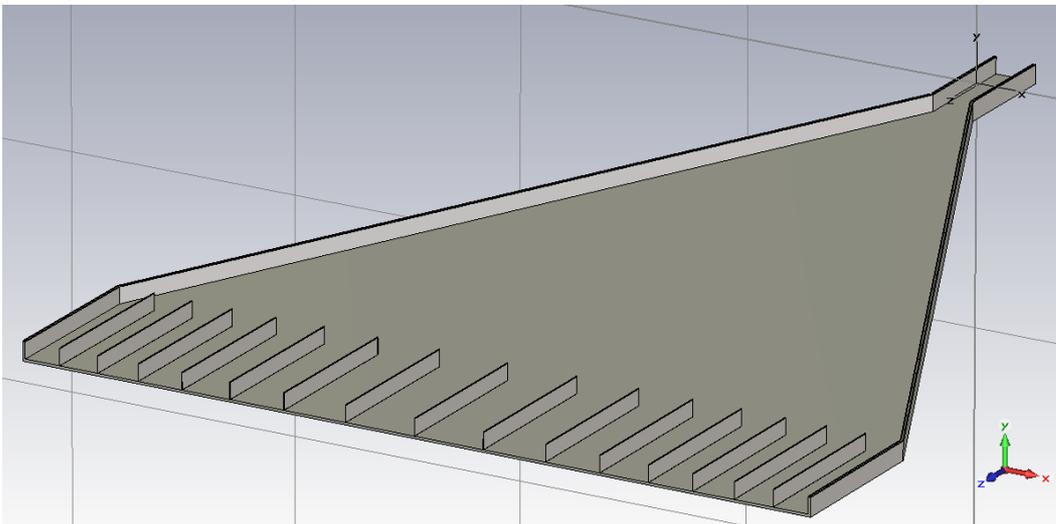


Figura 4.10: Corneta Setorial com Lente Plana(Corte).

d	0,983	0,883	0,774	0,690	0,628	0,584	0,551	0,528
n	0,861	0,824	0,763	0,689	0,606	0,516	0,422	0,323

Tabela 4.1: Espaçamento d e Índice de Refração n para Lente Plana.

borda da abertura da corneta.

Podemos obter uma melhora substancial do ganho e colimação do ângulo de meia potência no plano H caso alonguemos a dimensão ρ_2 da corneta ilustrado na Figura 4.2, entretanto, pode ser necessário exceder esta dimensão de um valor que inviabiliza a sua utilização. Para os casos em que uma corneta setorial, que atenda determinadas especificações, seja requerida em uma estrutura compacta, as lentes são uma alternativa simples e de baixo custo.

Através da utilização da metodologia descrita na Seção 4.2 a lente plana foi dimensionada sendo os valores do espaçamento entre as placas d normalizado pelo comprimento de onda λ_0 e índice de refração n associado à placas adjacentes dados na Tabela 4.1. O espaçamento máximo entre as placas é ajustado próximo de um comprimento de onda, pois a utilização de $n(0) = \sqrt{3}/2$ permite uma variação razoável dos espaçamentos d entre placas, enquanto o mínimo se aproxima de meio comprimento de onda. O índice de refração n é função dos espaçamentos utilizados, apresentando uma variação decrescente do centro da lente para sua borda. O comprimento das placas deve ser tal que a contribuição dos modos evanescentes gerados nas descontinuidades seja desprezível. Além disto, o comprimento deve ser dimensionado para que o espaçamento mínimo seja maior que $\lambda/2$, permitindo a propagação do modo TE_{10} entre todas as placas. Dessa forma, o comprimento utilizado será $w = 2\lambda_g$, sendo λ_g o comprimento de onda na primeira abertura ao centro da lente.

Os valores obtidos permitem a construção de uma corneta setorial no plano H com lente plana como a ilustrada nas figuras 4.9 e 4.10 onde podemos observar a distribuição simétrica das placas, cujos espaçamentos que determinam cada abertura estão descritos na Tabela 4.1, com relação a placa inicial, centrada em $x = 0$.

4.3.2

Projeto de Corneta com Lente Côncava

Para um estudo comparativo, a lente côncava a ser dimensionada deverá equipar uma corneta setorial no plano H com dimensões do guia alimentador idênticas ao caso anterior. As dimensões restantes são $a_1 = 11,88\lambda$, $\rho_2 = 12\lambda$,

determinando um ângulo de flare $\psi_h = 26,84^\circ$. Estas dimensões determinam o caso da corneta com lente côncava, e as pequenas diferenças nas dimensões, quando comparadas ao caso anterior, permitem o ajuste da lente a abertura da corneta setorial.

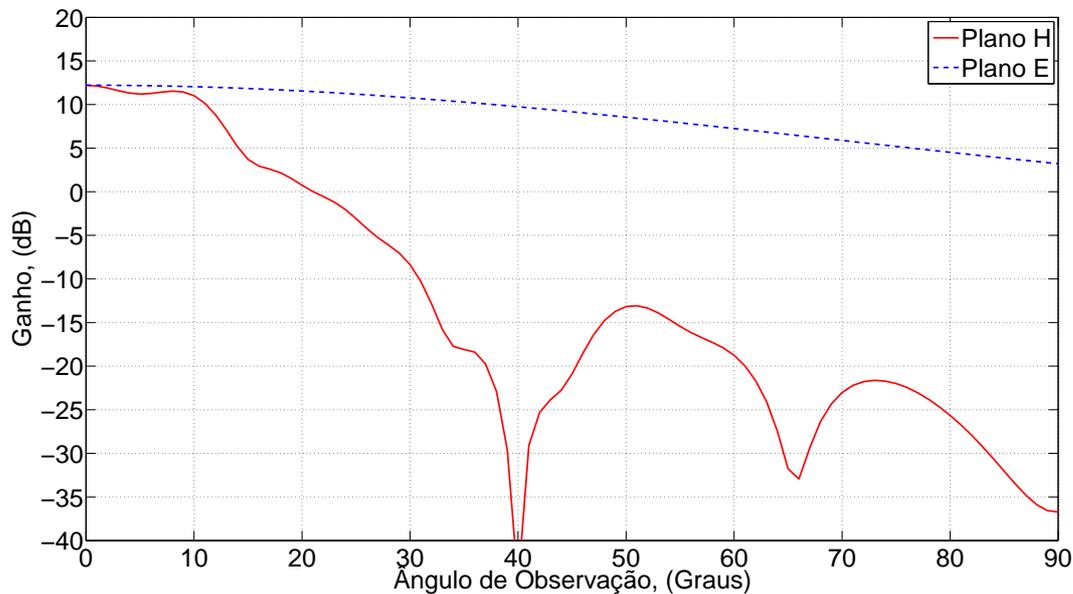


Figura 4.11: Diagrama de Radiação da Corneta - Exemplo II.

A análise eletromagnética forneceu os resultados para região de campo distante apresentados na Figura 4.11, onde podemos observar o diagrama de radiação nos planos principais. Foi obtido um ganho de 12,2 dB para a direção principal em 0° , enquanto o ângulo de meia potência, nos planos principais E e H , foram de 89° e 23° , respectivamente.

w_1	w_2	w_3	w_4	w_5	w_6	w_7	w_8	w_9	w_{10}
1,026	1,106	1,240	1,430	1,681	1,997	2,386	2,859	3,432	4,130

Tabela 4.2: Comprimento das Placas para Lente Côncava.

Utilizando a metodologia descrita na Seção 4.2 a lente côncava foi dimensionada sendo os valores do comprimento das m placas w_m , normalizado pelo comprimento de onda λ_0 , dados na Tabela 4.2. O índice de refração equivalente $n = 0,55$, que assegura pouca reflexão para uma extensa gama de ângulos de incidência, é função do espaçamento $d = 0,59\lambda$ entre as placas utilizado, e a distância da placa central ao centro de fase da corneta de $15,15\lambda$.

Os valores obtidos permitem a construção de uma corneta setorial no plano H com lente côncava como a ilustrada nas figuras 4.12 e 4.13 onde podemos observar a distribuição simétrica das placas, cujos comprimentos estão descritos na Tabela 4.2, além do espaçamento uniforme entre placas.

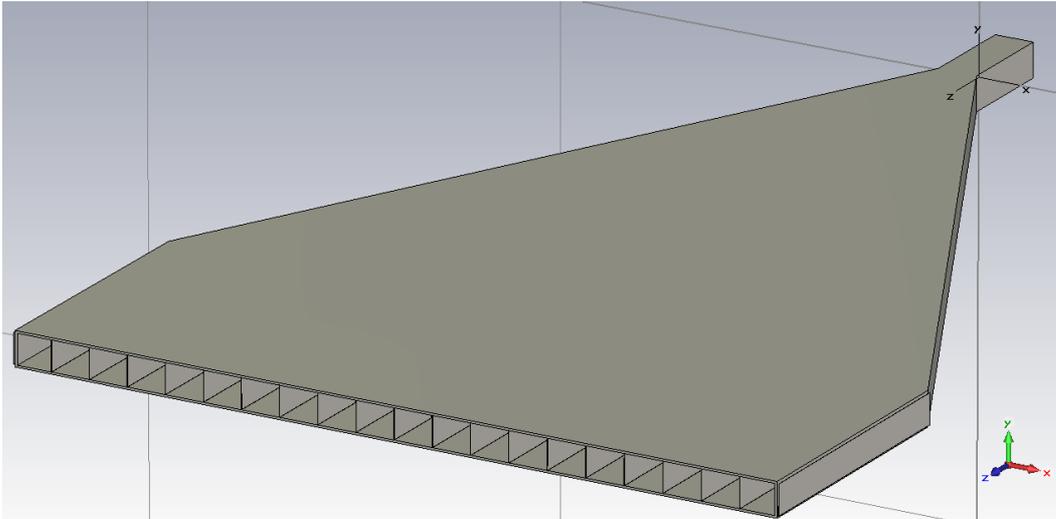


Figura 4.12: Corneta Setorial com Lente Côncava.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0821487/CA

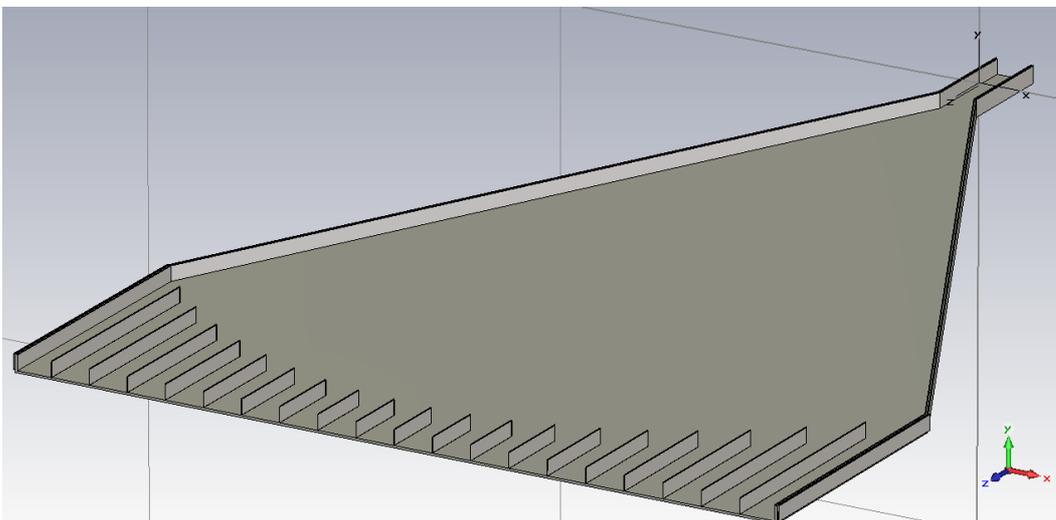


Figura 4.13: Corneta Setorial com Lente Côncava(Corte).

4.4

Aproximação para o Campo Radiado pela Corneta com Lente

Os espaços entre placas metálicas são dimensionados para que exista apenas a propagação do modo fundamental TE_{10} e o comprimento para que os modos evanescentes sejam desconsiderados, permitindo supor que na saída dos guias formados por placas adjacentes exista uma distribuição de campos que se aproxima a deste modo. A amplitude dos modos na abertura dependerá da amplitude dos campos na entrada das placas.

Para estimar o campo radiado pela corneta com lente, pode-se supor que o campo radiado seja composto pelas contribuições deste conjunto de aberturas iluminadas pelos campos do modo TE_{10} , desconsiderando-se, também, o acoplamento entre os diversos elementos da lente.

A amplitude do modo TE_{10} que se propaga em cada guia que compõe a lente é proporcional a amplitude do vetor campo elétrico da onda cilíndrica incidente no centro da porta de entrada do guia. Esta distribuição de amplitude é aproximada pela distribuição do modo TE_{10} cilíndrico que se propaga na corneta, descritos pelas equações 4-2 e 4-3, e dependerá da posição de entrada do guia sob análise.

A partir da Figura 4.14, as componentes de campo distante radiadas pela m -ésima abertura iluminada pelo modo fundamental são expressas por [1]:

$$E_{\theta m}(\theta, \phi) = -\frac{\pi}{2} C_m \operatorname{sen} \phi \frac{\cos X_m}{X_m^2 - \left(\frac{\pi}{2}\right)^2} \frac{\operatorname{sen} Y}{Y} \quad (4-13)$$

$$E_{\phi m} = -\frac{\pi}{2} C_m \cos \theta \cos \phi \frac{\cos X_m}{X_m^2 - \left(\frac{\pi}{2}\right)^2} \frac{\operatorname{sen} Y}{Y} \quad (4-14)$$

$$H_{\theta m} = -\frac{E_{\phi m}}{\eta} \quad (4-15)$$

$$H_{\phi m} = -\frac{E_{\theta m}}{\eta} \quad (4-16)$$

Sendo que

$$X_m = \frac{k d_m}{2} \operatorname{sen} \theta \cos \phi \quad (4-17)$$

$$Y = \frac{k b}{2} \operatorname{sen} \theta \operatorname{sen} \phi \quad (4-18)$$

$$C_m = j \frac{d_m b k E_{0m} e^{-jkr}}{2\pi r} \quad (4-19)$$

onde E_{0m} é descrito pela Equação 4-2. Utilizando a origem como referência para fase (centro de fase) o campo distante radiado pelo conjunto de aberturas é dado por:

$$\vec{E} = \sum_{m=1}^M \vec{E}_m e^{jkx_m \sin \theta \cos \phi} + \sum_{m=-1}^{-M} \vec{E}_m e^{-jkx_m \sin \theta \cos \phi} \quad (4-20)$$

Devido a simetria das aberturas na lente, a expressão para o campo radiado pode ser reorganizada como:

$$E_{\theta m}(\theta, \phi) = \sum_{m=1}^M \vec{E}_m \{2 \cos(Z_m)\} \quad (4-21)$$

Sendo que

$$Z_m = \frac{kx_m}{2} \sin \theta \cos \phi \quad (4-22)$$

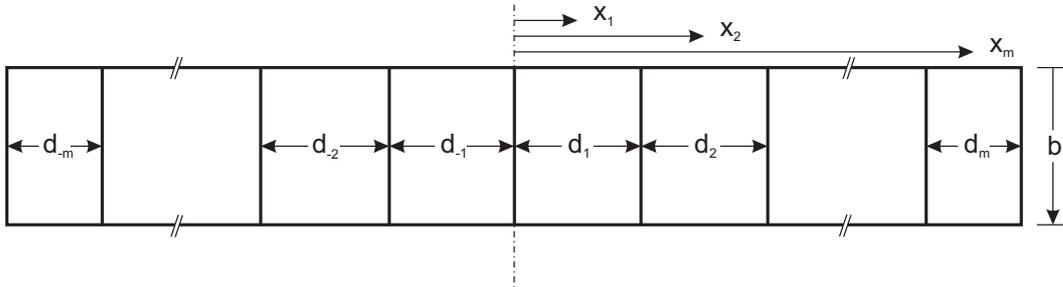


Figura 4.14: Geometria Frontal.

Entretanto, como mostrado no Capítulo 3, ao incidir sobre o conjunto de placas paralelas, parte da onda é transmitida através das placas e parte é refletida ao meio de onde a onda originou-se. A parcela transmitida é caracterizada por um coeficiente de transmissão $T(d, \psi)$ e um deslocamento de fase $\Delta_\phi(d, \psi)$ obtido em função do espaçamento entre as placas d e do ângulo de incidência ψ . Estes termos permitem corrigir a amplitude e fase do campo que se propaga entre as placas e, conseqüentemente, a distribuição de campo na saída da lente. Desta forma, a amplitude e fase do modo TE_{10} que se propaga na m -ésima abertura será dada por:

$$E_{0m}(d, \theta_i) = |E_{0m}| T(d_m, \theta_m) e^{j\Delta_\phi(d_m, \theta_m)} \quad (4-23)$$

Este ajuste permite contabilizar os efeitos ocorridos na transição da corneta para a lente em sua abertura, efeitos estes não considerados durante sua síntese, mas que modificam o comportamento da estrutura como um todo, sendo percebidos no diagrama de radiação. Efeito semelhante pode ser observado na transição lente espaço livre na saída de cada guia que compõe a lente, sendo o comportamento da onda descrito por Rudduck e Tsai [17] através da utilização de técnica rigorosa de análise da propagação do modo TE_{10} entre placas. Esta contribuição é importante em virtude da variação de espaçamento entre placas de uma abertura localizada mais ao centro da lente, da ordem de um comprimento de onda, em comparação com uma abertura localizada no extremo da lente, da ordem de meio comprimento de onda. Uma aproximação linear do deslocamento de fase para esta variação representa um deslocamento de aproximadamente 60° entre uma abertura ao centro e outra na borda da lente. O erro oriundo desta simplificação estaria nas aberturas dos extremos, mas em virtude da amplitude dos campos incidentes nesta região serem substancialmente reduzidas, sua contribuição será desprezada.

Afim de avaliar a técnica de projeto e suas aproximações, as estruturas projetadas foram analisadas pelo software comercial CST (*Computer Simulation Technology*). Este software utiliza técnica de análise rigorosa baseada no domínio do tempo que incorpora os efeitos difrativos e acoplamento entre as aberturas.

4.5 Análise de Cornetas com Lentes

Para avaliar as técnicas aproximadas de síntese e análise utilizadas neste trabalho, os projetos de corneta e lentes corretoras de fase apresentados nas seções anteriores serão analisados através do software comercial CST (*Computer Simulation Technology*) e os resultados obtidos serão utilizados como referência. Dessa forma, poderemos avaliar não somente a técnica de síntese mas, também, o desempenho de cada uma das aproximações introduzidas no modelo de análise na predição dos diagramas de radiação da corneta com lente. Do ponto de vista do tempo de processamento, os métodos aproximados são executados numa escala de tempo de segundos enquanto a análise via CST opera numa escala de horas, não sendo a opção mais eficiente para um processo repetitivo de dimensionamento da estrutura.

4.5.1 Análise de Corneta com Lente Plana

A lente plana dimensionada na Seção 4.3 foi modelada no CST e seu comportamento eletromagnético analisado. O dimensionamento completo utilizado na modelagem da estrutura está resumido nas tabelas 4.3 e 4.4. Os diagramas de radiação nos planos principais são mostrados nas figuras 4.15 e 4.16, onde são comparados os resultados obtidos via CST e através do modelo de conjunto de aberturas sem os efeitos difrativos descritos no Capítulo 3.

Parâmetro	Propriedade	Valor
f_0	frequência de operação	10 GHz
a	dimensão do guia	$0,6\lambda$
b	dimensão do guia	$0,4\lambda$
a_1	dimensão da abertura	$11,25\lambda$
ρ_2	dimensão do guia à abertura	12λ
w	dimensão das placas	2λ
N	número de placas	17

Tabela 4.3: Parâmetros da Corneta com Lente Plana.

b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7	b_8
0	0,983	1,867	2,640	3,330	3,960	4,543	5,093	5,623

Tabela 4.4: Coordenada das Placas para Lente Plana.

Apesar dos diagramas no plano E apresentarem comportamento semelhante, no plano H eles divergem tanto nos lóbulos próximos ao lobo principal, onde seria esperada uma maior concordância, quanto nos lóbulos mais afastados, onde os efeitos difrativos não considerados se tornam mais preponderantes. Observa-se na comparação dos diagramas entre 0° e 40° que o diagrama de referência (CST) não apresenta os nulos bem definidos previstos pelo modelo das aberturas, indicando que os campos na saída das lentes não apresentam fase uniforme, produzindo o preenchimento dos nulos.

Em uma segunda etapa do estudo comparativo, os coeficientes de transmissão e deslocamento de fase na entrada da lente são introduzidos no modelo de conjunto de aberturas, conforme os campos dados pela Equação 4-23. Os resultados para os diagramas no plano H obtido com este modelo são mostrados na Figura 4.17 junto com o diagrama fornecido pelo CST. Observa-se uma melhor concordância para o diagrama entre 0° e 20° com o preenchimento dos nulos. Em uma terceira etapa, o deslocamento de fase em cada abertura previsto em [17] é adicionado ao modelo de conjunto de aberturas. O diagrama obtido para o plano H é mostrado na Figura 4.18, onde observa-se que, apesar

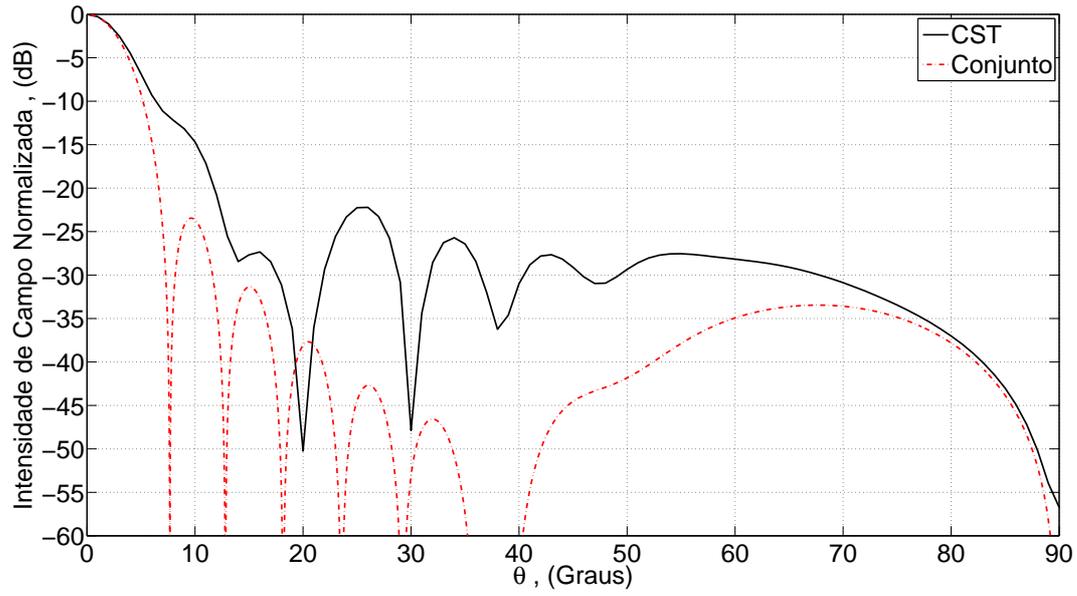


Figura 4.15: Diagrama de Radiação Corneta com Lente Plana Plano H - Caso Ideal.

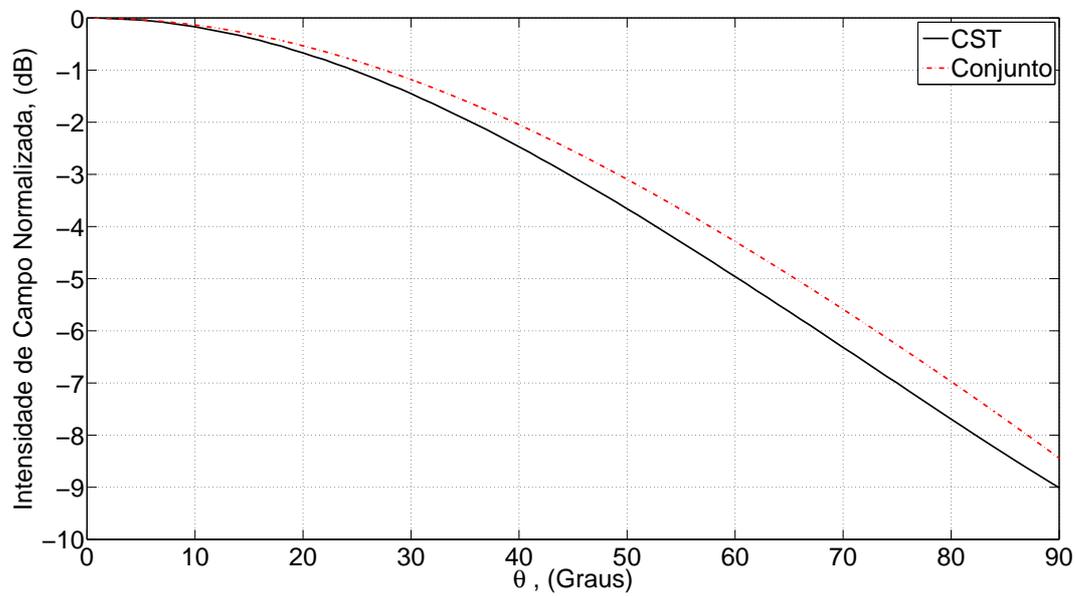


Figura 4.16: Diagrama de Radiação Corneta com Lente Plana Plano E - Caso Ideal

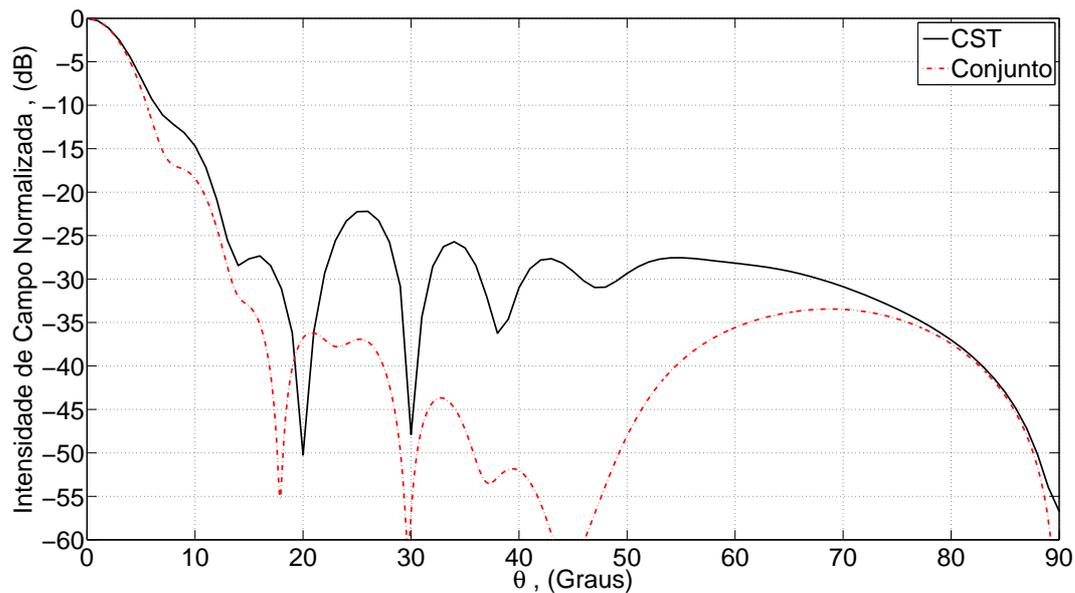


Figura 4.17: Diagrama de Radiação Corneta com Lente Plana Plano H - Deslocamento de Fase I.

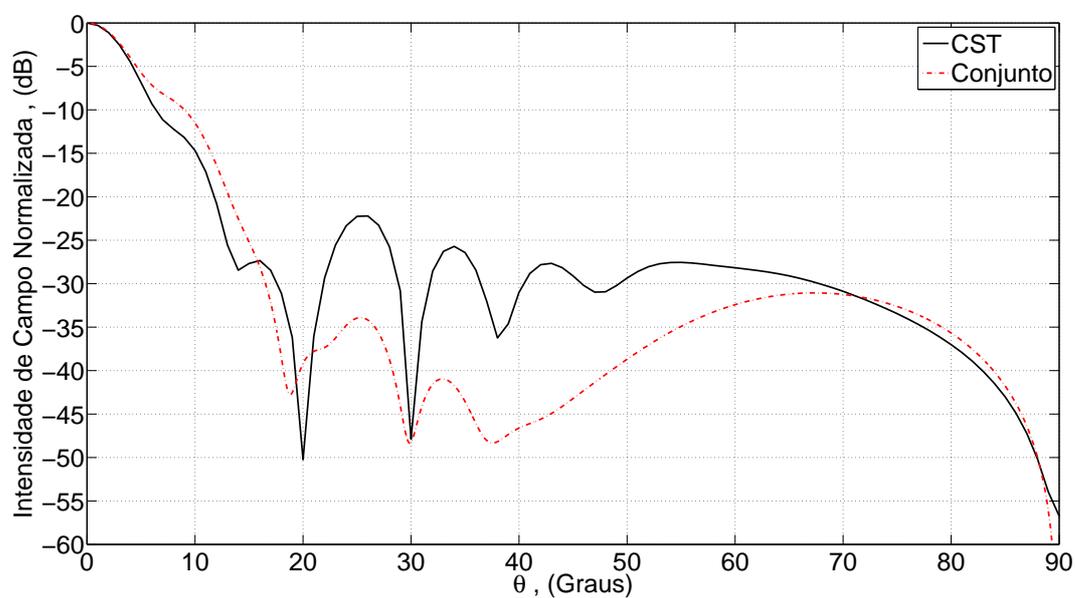


Figura 4.18: Diagrama de Radiação Corneta com Lente Plana Plano H - Deslocamento de fase II.

de uma melhora na aproximação para o diagrama principal, os lóbulos mais afastados apresentam significativas discrepâncias.

Para testar os limites do modelo de conjunto de aberturas, foram utilizados os resultados da análise fornecida pelo CST para determinar a amplitude Λ e a fase Φ do campo no centro de cada abertura de guia associada a lente. Para tal, foram colocadas pontas de prova (probes) no centro de cada abertura para determinação do campo e os valores obtidos estão listados na Tabela 4.5, sendo os valores de amplitude normalizados pelo máximo e as fases dadas em graus.

	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	d_7	d_8
Λ_{Probes}	1	0,82	0,80	0,64	0,26	0,40	0,19	0,01
$\Lambda_{Conjunto}$	0,91	0,91	0,79	0,65	0,49	0,34	0,19	0,05
Φ_{Probes}	98,01	108,65	120,70	136,91	154,11	151,41	141,77	12,27
$\Phi_{Conjunto}$	-6,99	9,97	32,47	50,34	64,04	81,82	98,59	98,28

Tabela 4.5: Amplitude Normalizada e Fase do Campo Elétrico nas Aberturas.

As distribuições de amplitude e fase descritas na Tabela 4.5 permitem a obtenção do campo distante pelo método de conjunto de antenas onde os pesos associados as amplitudes e fases do campo elétrico em cada abertura são os valores obtidos com os probes na parte externa da lente, normalizados com relação ao máximo. Uma análise adicional dos valores de amplitude e fase no interior da corneta permitem concluir sobre as causas que deterioram o resultado apresentado. As distribuições do modelamento apresentam o comportamento cossenoidal do modo fundamental com um decaimento do centro para o extremo, enquanto os valores obtidos com os probes apresenta pequena discrepância, exceto para a abertura d_5 , cuja diferença é acentuada, como pode ser visto na Figura 4.19.

Em algumas situações, o modo fundamental TE_{10} pode não ser o único modo relevante no interior da corneta. Dentre os modos de alta ordem gerados na descontinuidade entre o guia alimentador e a corneta, o modo TE_{30} pode ter influência significativa no comportamento do dispositivo. Para um ângulo ψ acima de 20° , a amplitude deste modo pode ser considerável na abertura da corneta [2]. Com a presença destes dois modos simultaneamente na abertura da corneta, o diagrama de radiação pode ficar mais largo ou mais estreito, dependendo da fase relativa dos modos. Entretanto, um aumento do nível de lóbulo secundário sempre ocorrerá.

Adicionalmente, é possível observar o comportamento eletromagnético no interior da corneta com lente, como ilustrado anteriormente para o caso da corneta apenas. Este comportamento, apresentado na Figura 4.20, é distinto do

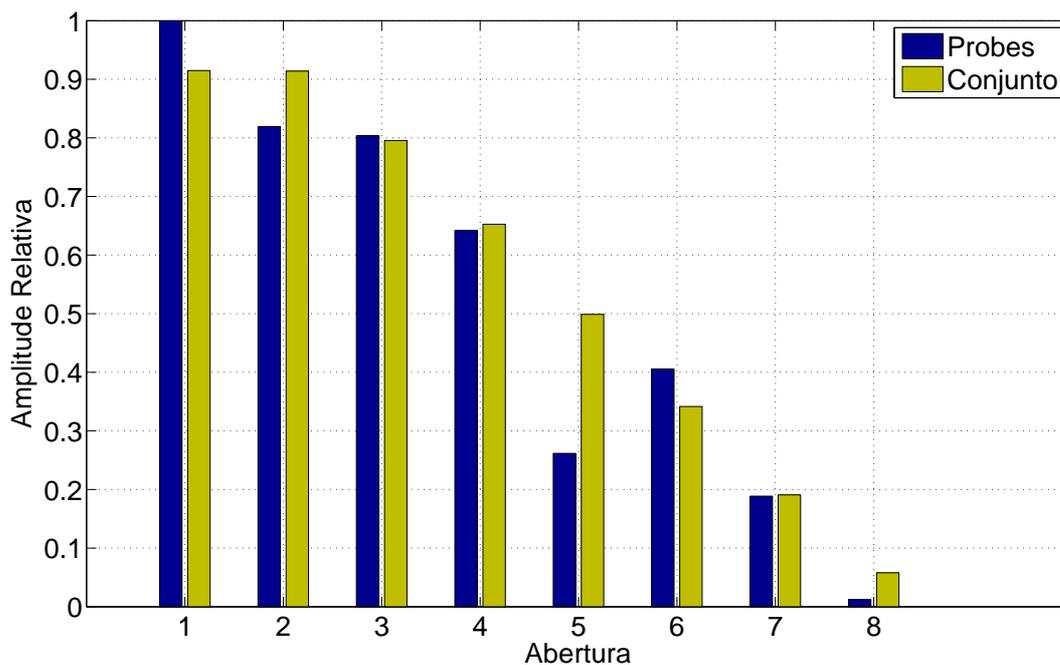


Figura 4.19: Amplitude Relativa do Campos nas Aberturas.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0821487/CA

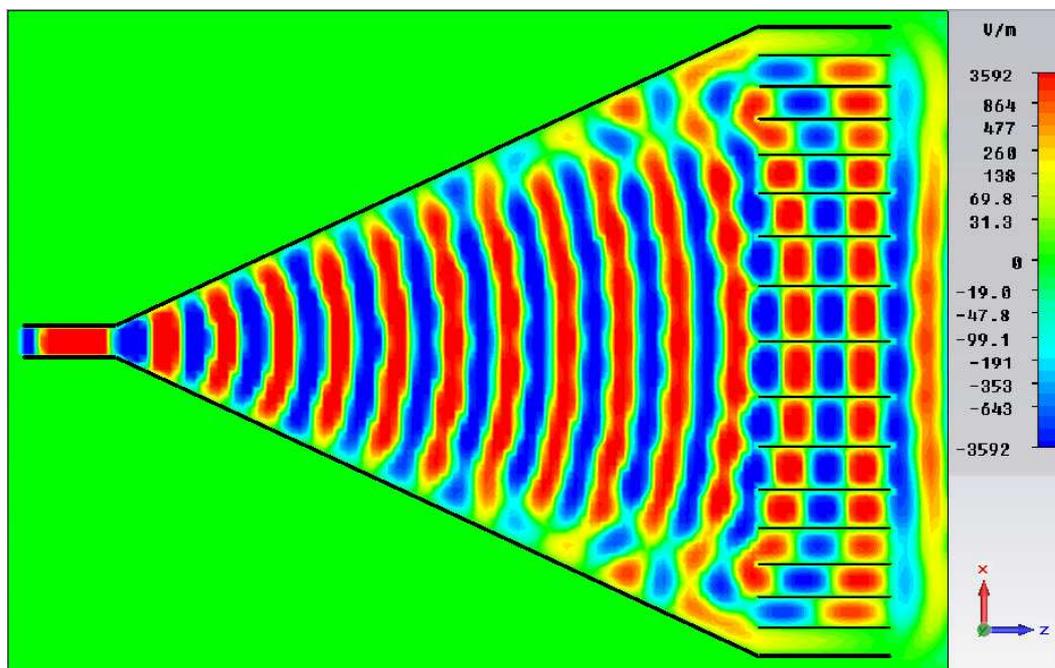


Figura 4.20: Distribuição de Campo no Interior da Corneta com Lente.

apresentado no caso da corneta, ilustrado na Figura 4.8, para o campo nos seus extremos. A distribuição de campo elétrico, que antes apresentava uma frente de onda quase cilíndrica na abertura da corneta, agora apresenta perturbações do campo elétrico nos extremos da abertura com intensidade maior que o caso anterior. Tais perturbações do campo elétrico não foram consideradas no modelo proposto neste trabalho, sendo uma possível fonte de erro.

Implementando-se o modelo de conjunto de antenas a partir dos valores de amplitude e fase obtidos pelos probes na saída da lente temos um resultado em boa concordância com os resultados de simulação. Este seria o caso em que as perturbações do campo no interior e exterior da corneta estão contabilizados para composição do campo na abertura do elemento em questão. Os resultados obtidos estão ilustrados na Figura 4.21, e implicam na validação da técnica de conjunto de antenas uma vez que as amplitudes e fases sejam corretamente especificadas.

Embora os resultados não apresentem concordância total, não podemos desprezar o efeito positivo das lentes acopladas a corneta, principalmente com relação a melhora do ganho. A Figura 4.22 apresenta os resultados de simulação para a corneta sem a lente e com a mesma acoplada em sua abertura, onde temos um ganho de 5,5 dB sobre os 11,6 dBi da corneta propiciado pela lente, e conseqüente estreitamento do lóbulo principal.

Os valores teóricos para uma abertura retangular com as dimensões da lente implementada, iluminada pelo modo fundamental TE_{10} , para a largura de feixe de meia potência ($HPBW$), largura de feixe do primeiro nulo ($FNBW$), nível do primeiro lóbulo lateral (FSL) e diretividade (D_0) podem ser estimados como descritos em [1], e são dados na Tabela 4.6 em comparação com os obtidos via software e pelo modelo implementado.

Parâmetro	Balanis	CST	Conjunto
$HPBW$	6, 11°	6, 5°	6, 8°
$FNBW$	15, 28°	20°	18, 6°
FSL	-23 dB	-22, 3 dB	-33, 9 dB
D_0	16, 6 dBi	17, 1 dBi	-

Tabela 4.6: Características do Diagrama de Radiação - Lente Plana.

4.5.2

Análise de Corneta com Lente Côncava

A lente côncava dimensionada na Seção 4.3 foi modelada no software e seu comportamento eletromagnético analisado. O dimensionamento completo utilizado na modelagem da estrutura está resumido nas tabelas 4.2 e 4.7. As

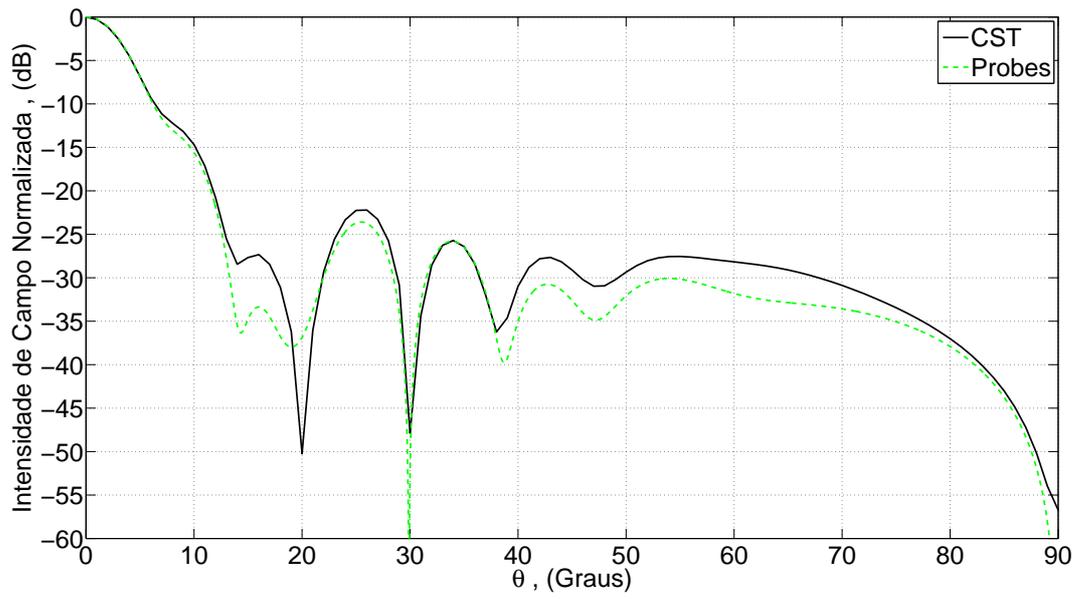


Figura 4.21: Diagrama de Probes para Lente Plana.

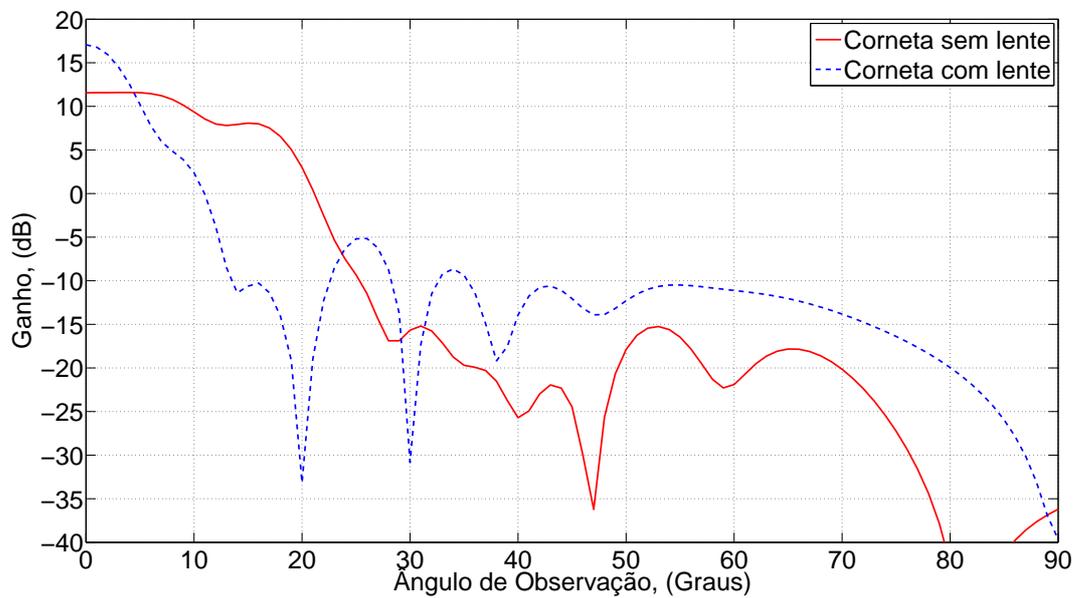


Figura 4.22: Diagrama de Radiação Corneta com Lente Plana Plano H - Comparativo.

figuras 4.23 e 4.24 apresentam os resultados do diagrama de radiação na região de campo distante da corneta com lente obtidos via software em comparação com o modelo de antenas obtido na Seção 4.4.

Parâmetro	Propriedade	Valor
f_0	frequência de operação	10 GHz
a	dimensão do guia	$0,6\lambda$
b	dimensão do guia	$0,4\lambda$
a_1	dimensão da abertura	$11,88\lambda$
ρ_2	dimensão do guia à abertura	12λ
d	espaçamento entre placas	$0,59\lambda$
N	número de placas	21

Tabela 4.7: Parâmetros da Corneta com Lente Côncava.

Os diagramas no plano E apresentaram comportamento semelhante, enquanto no plano H há boa concordância para o lóbulo principal, mas divergência para os lóbulos mais afastados do lóbulo principal. Observa-se nesta comparação, na faixa de 0° a 40° , uma divergência menor e, embora o diagrama de referência apresente os nulos preenchidos, que os nulos do diagrama estão relativamente bem definidos. Para o restante da faixa esta divergência se acentua, requerendo portanto que se incorpore os efeitos difrativos ao modelo.

Na segunda etapa deste estudo aplicaram-se os coeficientes de transmissão de potência e deslocamento de fase de placas metálicas, obtidos em função do espaçamento entre placas e do ângulo de incidência, na entrada da lente. Os valores destas grandezas associados à saída das aberturas, outrora com espaçamento distintos, podem ser desprezados em virtude das aberturas terem espaçamentos idênticos para este caso, gerando assim uma contribuição idêntica de deslocamento de fase nas aberturas dos guias que compõem a lente. Os resultados para o diagrama de radiação no plano H obtidos com este modelo são apresentados na Figura 4.25 juntos com o diagrama de radiação de referência. Observa-se uma divergência menos acentuada para o diagrama para os lóbulos mais afastados do principal.

Implementou-se novamente o modelo proposto de conjunto de antenas utilizando-se os valores de amplitude e fase do campo elétrico no centro das aberturas da lente obtidos com o software, sendo o resultado ilustrado na Figura 4.26. Novamente os resultados obtidos demonstram a validade do modelo de conjunto aplicado as aberturas, ficando a boa concordância dos resultados intrinsecamente relacionada aos pesos das amplitudes e fases aplicados ao modelo, como descrito anteriormente.

O efeito do acoplamento da lente na abertura da corneta setorial no plano H pode ser visualizado na Figura 4.27 que apresenta os diagramas de radiação

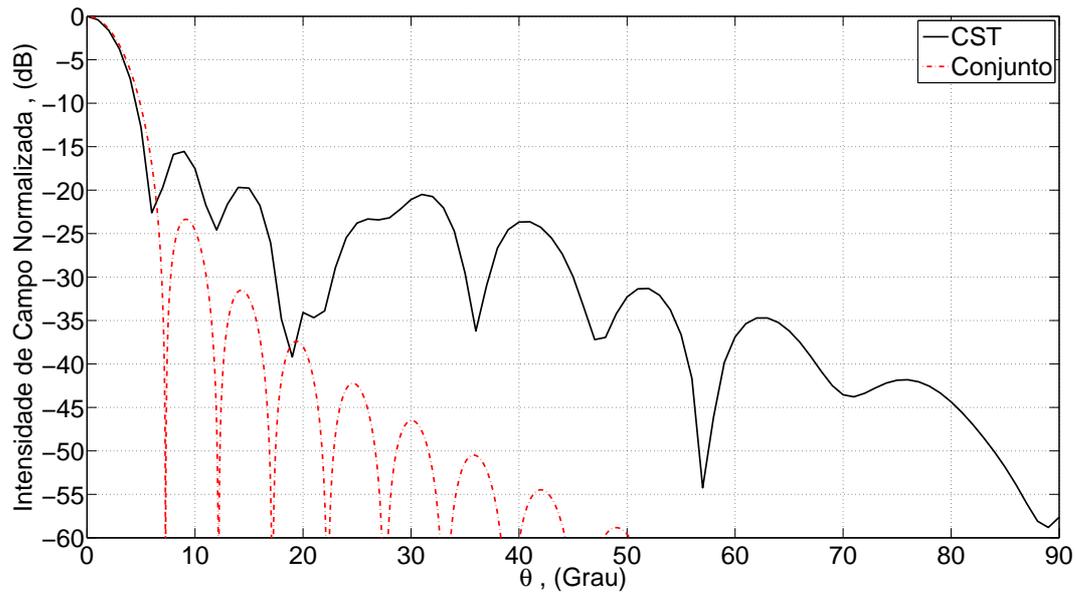


Figura 4.23: Diagrama de Radiação Corneta com Lente Côncava Plano H - Caso Ideal.

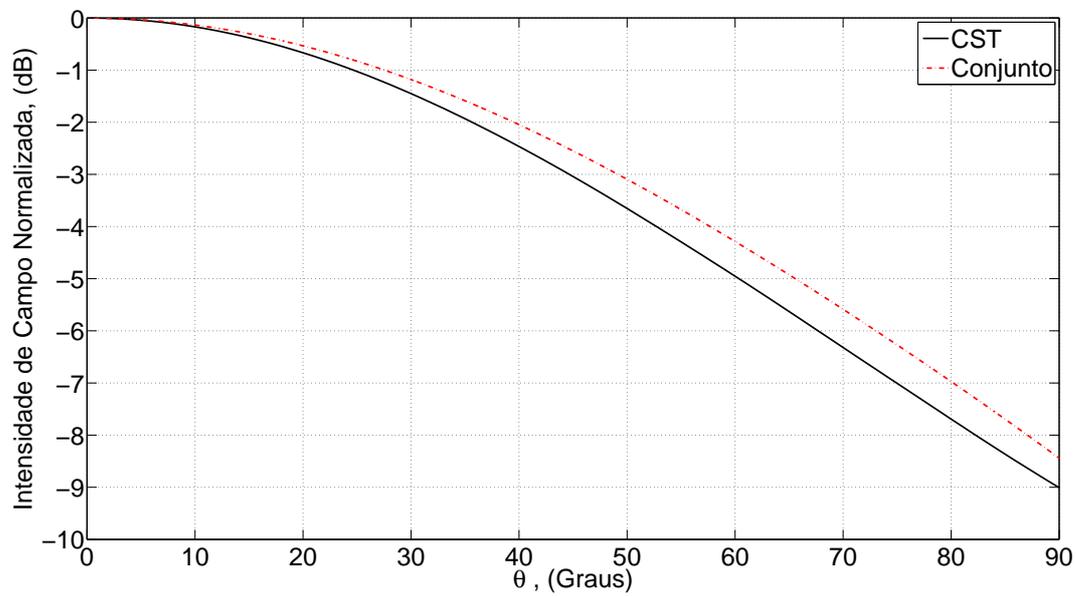


Figura 4.24: Diagrama de Radiação Corneta com Lente Côncava Plano E - Caso Ideal.

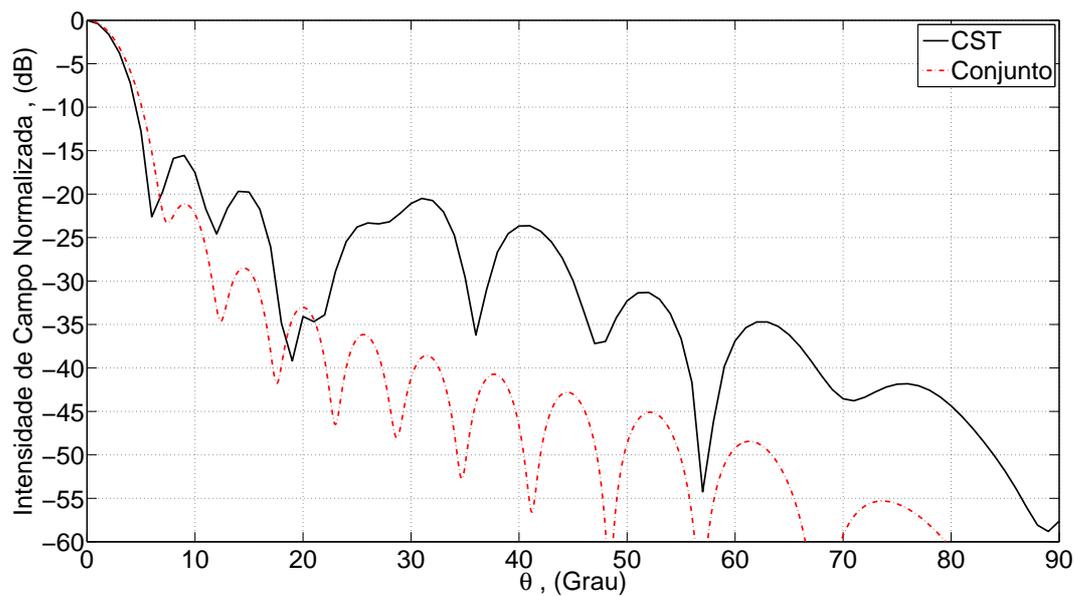


Figura 4.25: Diagrama de Radiação Corneta com Lente Côncava Plano H - Deslocamento de Fase I.

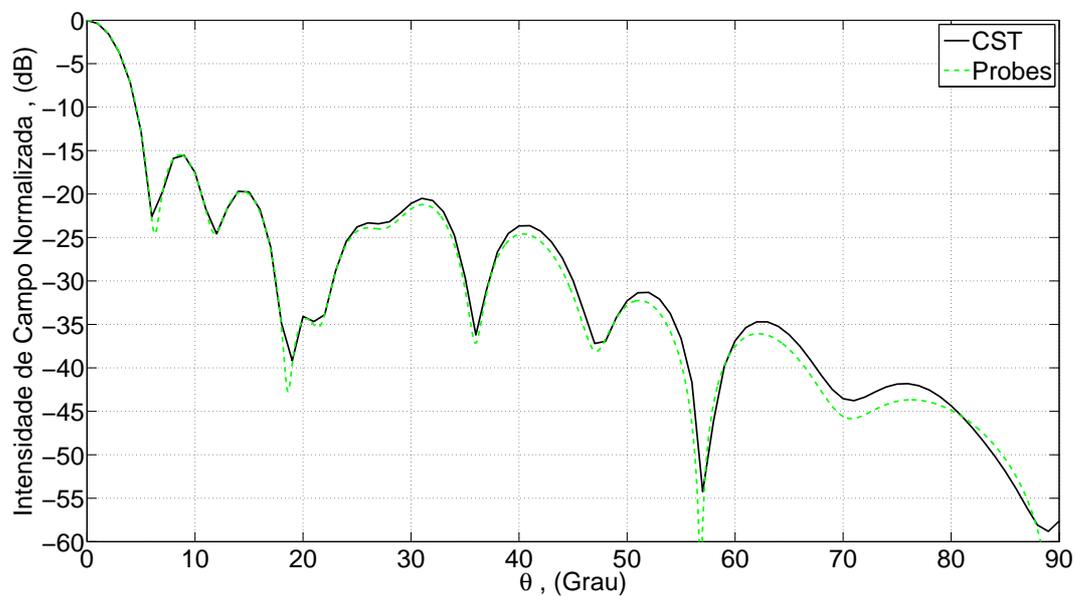


Figura 4.26: Diagrama de Probes para Lente Côncava.

na região de campo distante da corneta em comparação com a corneta com lente. Observa-se um ganho de 5,8 dB sobre os 12,22 dBi da corneta, sendo este aumento propiciado pela correção de fase no plano das aberturas obtido com a lente. Conseqüentemente, temos novamente um estreitamento do lóbulo principal do diagrama.

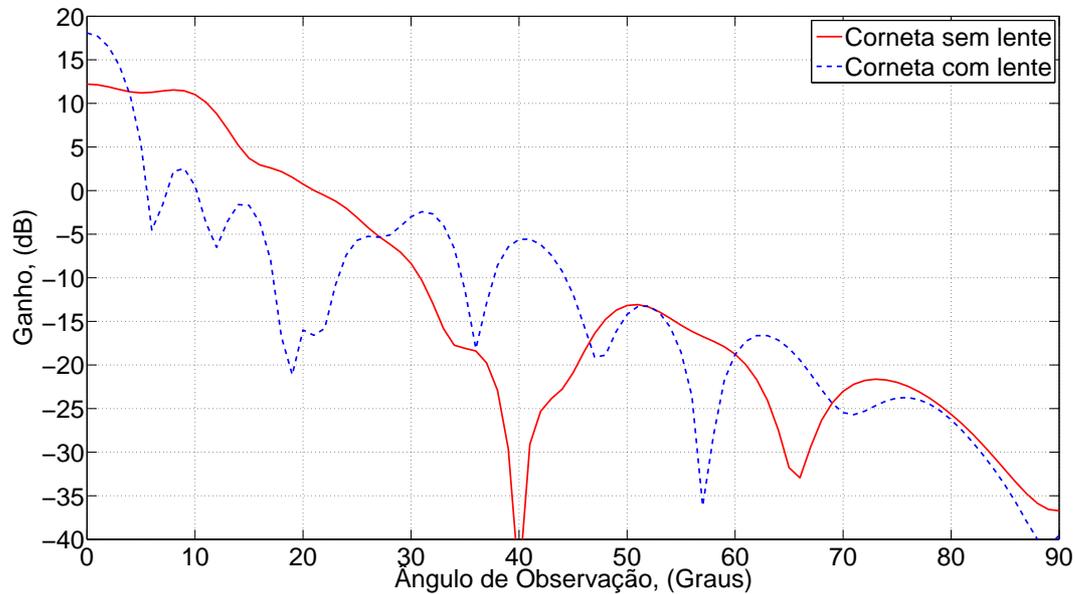


Figura 4.27: Diagrama de Radiação Corneta com Lente Plana Plano H - Comparativo.

Os valores teóricos para uma abertura de mesma dimensão da utilizada na corneta com lente, iluminada pelo modo fundamental, forneceria os valores característicos descritos na Tabela 4.8 contra os obtidos pelo software e pelo modelamento apresentado.

Parâmetro	Balanis	CST	Conjunto
$HPBW$	5,8°	5,4°	5,9°
$FNBW$	14,51°	11,9°	15°
FSL	-23 dB	-15,5 dB	-21,2 dB
D_0	16,8 dBi	18,0 dBi	—

Tabela 4.8: Características do Diagrama de Radiação - Lente Côncava.