4 Estudo de Estruturas de Acoplamento

4.1. Introdução

O projeto do sistema de alimentação de antenas discones proposto neste trabalho, envolve a associação de um conector comercial padrão a um guia de onda coaxial, sendo que ambos podem apresentar dimensões distintas. Essa eventual diferença nas dimensões desses dispositivos pode resultar em um desempenho para a perda de retorno incompatível com as especificações desejadas, especialmente quando se pretende projetar essa antena para operar em banda larga. Para minimizar a perda de retorno, pode-se colocar entre o conector e o guia de onda coaxial uma estrutura de acoplamento cuja complexidade de projeto dependerá da largura da banda de operação e da diferença entre as dimensões.

A referência [1] apresenta o projeto de uma antena discone modificada, dimensionada para operar com uma perda de retorno menor que -15dB na faixa de freqüência de 0.8 a 3.6GHz. Entretanto, os resultados das simulações mostrados em [1] não incluem as perdas de retorno que ocorrem ao se utilizar a alimentação através de conectores comerciais. A Figura 4.1 ilustra a antena discone modificada e as diferenças no sistema de alimentação.

Neste capítulo, serão apresentados exemplos de acopladores a serem utilizados nessa antena, para que, ao serem inseridos no sistema de alimentação da mesma, assegurem que o desempenho para a perda de retorno seja menor que -15dB. Para atender às especificações, esse acoplador deverá apresentar perda de retorno inferior a -35dB ao longo da faixa de operação. Além de assegurar o desempenho elétrico, na análise de cada dispositivo de acoplamento, serão considerados os aspectos mecânicos envolvidos na usinagem e montagem desses acopladores e também na rigidez da antena.

No projeto e análise dessas estruturas de acoplamento será utilizado o Método de Casamento de Modos, descrito nos capítulos anteriores. Para isso, será considerado que o acoplador tenha em suas extremidades dois guias coaxiais infinitos: um com as dimensões correspondentes ao conector tipo N, onde os raios dos cilindros condutores interno e externo são dados por a = 1.6mm e b = 3.7mm, respectivamente; e outro com as dimensões correspondentes ao guia de entrada da antena, onde os raios dos cilindros condutores interno e externo são dados por a = 3.1mm e b = 7.3mm, respectivamente. Os dois guias de onda coaxiais infinitos apresentam impedância característica de 50 Ω .



Figura 4.1 – Alimentação de uma antena discone modificada, através de um guia de onda coaxial.

4.2. Primeira estrutura de acoplamento

O primeiro exemplo a ser considerado neste estudo é ilustrado na Figura 4.2, onde as dimensões dos guias de onda coaxiais intermediários são gradativamente ajustadas para produzir o acoplamento entre o guia de onda proveniente do conector e o guia de onda conectado à junção da antena. Em todas as seções, as dimensões dos cilindros condutores internos e externos foram ajustadas para que se obtenha uma impedância característica de 50 Ω . As dimensões dos raios internos e externos das seções de guias de onda coaxiais são listadas na Tabela 4.1. Neste estudo, serão considerados diversos valores para os comprimentos das seções retas dos guias de onda lisos L_i e analisados o seu impacto no desempenho do acoplador.



Figura 4.2 – Estrutura de acoplamento entre dois guias de onda coaxiais de dimensões diferentes.

Seção de guia de onda coaxial	A (mm)	B (mm)
Seção 2	2.00	4.60
Seção 3	2.50	5.75

Tabela 4.1 – Dimensões dos cilindros condutores interno e externo para o acoplador da Figura 4.2.

Para esse adaptador, existem dois problemas a serem considerados. O primeiro envolve a montagem mecânica do dispositivo, que apresenta dificuldades para o alinhamento perfeito dos cilindros condutores interno e externo, devendo-se considerar possíveis discrepâncias no posicionamento relativo dos condutores. O segundo problema está relacionado às limitações teóricas que envolvem a aplicação do Método de Casamento de Modos nesse tipo de estrutura. Para que o método seja aplicável, a área livre de seção reta do guia de onda coaxial da direita deve estar contida totalmente na área livre de seção reta do guia de onda coaxial da esquerda em cada descontinuidade considerada, como ilustrado na Figura 3.3, o que não ocorre em nenhuma das descontinuidades que constituem a estrutura analisada.

Para contornar essa limitação teórica e, ao mesmo tempo, prever o comportamento desses desajustes mecânicos, será incluído um pequeno deslocamento G do condutor central para a direita ou a esquerda, o que pode ocorrer em um caso real, como ilustrado na Figura 4.3. Um ponto importante a ser considerado na inclusão desse deslocamento, como discutido no item 3.3.2

do capítulo anterior, é o fato de que o número máximo de modos N a ser considerado na aproximação dos campos no interior do guia de onda coaxial liso cresce à medida que G diminui, aumentando, assim, o tempo computacional necessário no cálculo das matrizes de espalhamento associadas a essas seções de guias de onda coaxiais lisos.



Figura 4.3 – Estrutura de acoplamento com deslocamento *G* no cilindro condutor central (a) para a direita e (b) para a esquerda.

Considerando-se o dispositivo onde $L_1 = L_2 = 10mm$, a convergência de $|S11_{00}|(dB)$ em função do numero máximo N de modos TM_{0n} é ilustrada no conjunto de Figuras 4.4.(a)-(d), sendo adotados diferentes valores de G para esse dispositivo na freqüência de 1GHz. O conjunto de Figuras 4.5.(a)-(d) ilustra a convergência de $|S11_{00}|(dB)$ em função do numero máximo N de modos TM_{0n} para a freqüência de 3GHz, considerando-se os mesmos valores de G, L_1 e L_2 .

Analisando-se os resultados ilustrados nos conjuntos de Figuras 4.4 e 4.5, observa-se que, em ambos os casos, à medida que *G* aumenta, a convergência de $|S11_{00}|(dB)$ ocorre para poucos modos. Porém, os deslocamentos para a direita ou a esquerda convergem para valores diferentes. Por outro lado, à medida que *G* diminui, os valores de $|S11_{00}|(dB)$ convergem para o mesmo valor, tanto para o deslocamento para a direita. Entretanto, necessita-se considerar um número maior de modos para a aproximação dos campos no interior do guia de onda coaxial liso. Observa-se que, para *G*=10⁻³*mm* e considerando-se 20 modos TM no cálculo das matrizes de espalhamento, as discrepâncias entres os resultados obtidos nos deslocamentos para a direita e

esquerda são da ordem de 0.089dB nos dados obtidos para a freqüência de 1GHz, Figura 4.4.(c), e 0.095dB nos dados obtidos para a freqüência de 3GHz, Figura 4.5.(c).



Figura 4.4 – Convergência dos valores de $|S11_{00}|(dB)$ em função do número máximo *N* de modos TM_{0n} , para a freqüência de 1GHz, considerando (a) G = 0.1mm, (b) $G = 10^{-2} mm$, (c) $G = 10^{-3} mm$ e (d) $G = 10^{-4} mm$, da estrutura de acoplamento ilustrada na Figura 4.3.



Figura 4.5 – Convergência dos valores de $|S11_{00}|(dB)$ em função do número máximo *N* de modos TM_{0n} , para a freqüência de 3GHz, considerando (a) G = 0.1mm, (b) $G = 10^{-2}mm$, (c) $G = 10^{-3}mm$ e (d) $G = 10^{-4}mm$, da estrutura de acoplamento ilustrada na Figura 4.3.

Considerando os resultados ilustrados nos conjuntos de Figuras 4.4 e 4.5, pode-se estimar o comportamento da estrutura alinhada, G = 0, a partir dos resultados obtidos para G pequeno, escolhido em função do erro esperado e do número de modos TM necessários, buscando-se, nessa escolha, minimizar o tempo de processamento envolvido. Nas simulações que seguem, para prever o desempenho da estrutura de acoplamento alinhada ao longo da banda de freqüência de 0.8 a 3.6GHz, utilizou-se $G = 10^{-3} mm$ e N = 20 em cada seção de guia de onda coaxial liso.

O conjunto de Figuras 4.6.(a)-(c) mostra os valores obtidos para o módulo da perda de retorno, $|S11_{00}|(dB)$, considerando-se diferentes comprimentos



 $L = L_1 = L_2$ das seções de guias de onda. Os deslocamentos *G* para a direita e esquerda foram considerados para ilustrar a convergência dos resultados.

Figura 4.6 – $|S11_{00}|(dB)$ para a estrutura de acoplamento ilustrada na Figura 4.2, considerando o deslocamento para a direita e esquerda e (a) L = 10mm, (b) L = 12.5mme (c) L = 15mm.

A Figura 4.7 compara o desempenho da perda de retorno para os três valores de comprimento $L = L_1 = L_2$. Pode-se observar que, para determinado valor de *L*, as ondas refletidas nas três descontinuidades podem se combinar destrutivamente, reduzindo as perdas de retorno do dispositivo.



Figura 4.7 – $|S11_{00}|(dB)$ para o acoplador da Figura 4.2, considerando-se $L_i = 10, 12.5$ e 15mm.

De maneira aproximada, pode-se estimar a freqüência em que a combinação das ondas refletidas geradas nas três descontinuidades seja destrutiva. Como ilustrado na Figura 4.8, a perda de retorno total aproximada vista pela primeira seção de guia de onda, será dada pelo somatório das perdas parciais referentes a cada descontinuidade, considerando-se o defasamento que cada uma terá ao retornar para a primeira seção. A perda total pode ser expressa por:

$$\rho_T = \rho_1 + \rho_2 e^{jkL_T} + \rho_3 e^{j2kL_T}$$
(4.1)

Considerando-se que as perdas de retorno geradas em cada descontinuidade sejam aproximadamente iguais a ρ , a equação (4.1) pode ser reescrita como:

$$\rho_{T} = \rho e^{jkL_{T}} \left(1 + e^{-jkL_{T}} + e^{jkL_{T}} \right)$$
(4.2)

A equação (4.2) pode ser expressa por:

$$\rho_T = \rho e^{jkL_T} \left(1 + 2\cos(kL_T) \right) \tag{4.3}$$

A partir da equação (4.3), observa-se que a perda de retorno total aproximada será nula quando:

$$\lambda = 3L_r \tag{4.4}$$

Analisando-se a equação (4.4), observa-se que, para $L_T = 20$, 25 e 30mm, temse que a combinação destrutiva das ondas refletidas geradas nas três descontinuidades ocorre, aproximadamente, para 5, 4 e 3.3GHz. Através do dimensionamento adequado de L_i , pode-se estabelecer uma estratégia para reduzir as perdas de retorno ao longo da banda passante para esse tipo de dispositivo de acoplamento.



Figura 4.8 – Visualização das perdas parciais referentes a cada descontinuidade.

4.2.1. Otimização da Estrutura de Acoplamento

Como observado na Figura 4.7 e discutido nas aproximações feitas no final do item anterior, a escolha do comprimento L_i das seções de guia pode influenciar no comportamento da perda de retorno ao longo da banda passante. Nesta parte do trabalho, será analisado o dimensionamento dessas seções de guias que constituem esse tipo de estrutura de acoplamento, buscando-se chegar a uma configuração do dispositivo que a minimize as perdas de retorno. A busca dessa solução ótima será realizada através da utilização de um algoritmo de otimização baseado no método quasi-Newton com gradiente determinado pelo Método de Diferenças Finitas (*DBCONF / IMSL*). Esse algoritmo busca um vetor de *X* variáveis que minimiza uma função objetivo de entrada.

A função objetivo a ser minimizada foi construída a partir das diferenças entre os valores da perda de retorno obtidos através da simulação numérica e um valor estabelecido como objetivo, o que é ilustrado na Figura 4.9. Essas diferenças são obtidas para um conjunto de freqüências ao longo da banda de operação.

$$F(x) = \sum_{f=f_l}^{f_N} \begin{cases} \left(\Delta P_f(x)\right)^q \to \Delta P_f(x) > 0\\ 0 \to \Delta P_f(x) < 0 \end{cases}$$
(4.5)

onde: f_I e f_N são as freqüências inicial e final, respectivamente; x são as variáveis; q é o expoente a que essa diferença será elevada e, à medida em que se aumenta o seu valor, aumentará também a influência das diferenças maiores de $\Delta P_f(x)$ na composição da função objetivo. $\Delta P_f(x)$ será expresso por:

$$\Delta P_f(x) = \frac{P_f^S(x) - P_f^{obj}(x)}{\Delta_f}$$
(4.6)

onde: $P_f^S(x)$ é a perda de retorno calculada através das matrizes de espalhamento, utilizando-se o Método de Casamento de Modos; $P_f^{obj}(x)$ é a perda de retorno mínima que se deseja obter; e Δ_f é o peso para o resíduo em cada freqüência ao longo da banda passante.



Figura 4.9 – Visualização da função objetivo F(x).

Como ilustrado na Figura 4.9, a função F(x) utilizada faz o somatório das diferenças positivas para cada freqüência dentro da banda passante, ou seja, quando a perda de retorno calculada através das matrizes de espalhamento está acima da perda mínima estabelecida. Portanto, para F(x) = 0 tem-se uma perda de retorno ao longo da banda passante abaixo de um limiar pré-estabelecido para cada freqüência, obtendo-se, então, as dimensões otimizadas do acoplador que produzirão essa perda de retorno abaixo desse limiar.

4.2.2. Otimização das Dimensões dos Guias de Onda Coaxiais Lisos que Compõem a Estrutura de Acoplamento

Definida a função objetivo a ser minimizada, precisa-se, então, determinar as variáveis de otimização. Nesta seção, será analisado o desempenho da estrutura de acoplamento ilustrada na Figura 4.2 em função do número *N* de seções de guias de onda coaxiais que constituirá esse dispositivo. As dimensões dessas seções serão otimizadas. Para dimensionar os comprimentos dessas seções de guias de onda coaxiais lisos, fixando o comprimento total do dispositivo, será usada a equação descrita por:

$$\left(\frac{\rho}{\rho_{MAX}}\right)^{\gamma} + \left(\frac{z}{L_T}\right)^{\gamma} = 1$$
(4.7)

A equação (4.7) descreve as curvas ilustradas na Figura 4.10 para valores positivos de ρ e negativos de z, onde γ é o parâmetro real que controla o comportamento do raio de curvatura.



Figura 4.10 – Curvas descritas pela equação (4.7) em função de γ .

, Explicitando z na equação (4.7), obtém-se:

$$z = L_T \left(1 - \left(\frac{\rho}{\rho_{MAX}} \right)^{\gamma} \right)^{\frac{1}{\gamma}}$$
(4.8)

Pode-se definir o comprimento de cada seção de guia de onda coaxial liso do acoplador utilizando-se a equação (4.8) em função de γ e dos raios dos cilindros condutores interno ou externo de cada seção de guia de onda coaxial que compõe o acoplador. Neste caso, serão utilizadas as dimensões dos raios dos cilindros externos de cada seção de guia de onda coaxial, como ilustrado na Figura 4.11.



Figura 4.11 – Comprimento dos guias de onda coaxiais que compõem o acoplador em função da curvatura descrita pela equação (4.8) aplicada ao cilindro condutor externo do acoplador.

A partir das considerações anteriores, pode-se definir *N* seções de guias de onda coaxiais que acoplarão o guia de onda coaxial proveniente do conector e o guia de onda coaxial de entrada da antena. Fixando um comprimento total para a estrutura de acoplamento L_T , os comprimentos dessas *N* seções de guias de onda coaxiais, expressos em função dos raios dos condutores externos de cada seção e de γ_B , serão dados por:

$$L_n = L_T \left(1 - \left(\frac{B_n}{B_{MAX}} \right)^{\gamma^B} \right)^{\frac{1}{\gamma^B}}$$
(4.9)

Para otimizar o desempenho da estrutura de acoplamento ilustrada na Figura 4.2, utilizando-se o método descrito na seção anterior, foram gerados dois

casos de estruturas otimizadas. Em ambos os casos, foram ajustados os comprimentos das seções de guias de onda coaxiais através de γ^{B} e os raios dos cilindros condutores internos *A* de cada seção, sendo $L_{T} = 20mm$, para o primeiro, e $L_{T} = 30mm$, para o segundo caso.

No primeiro caso, o conjunto de Figuras 4.12.(a)-(c) compara o comportamento de $|S11_{00}|(dB)$ para a estrutura inicial de otimização e para a estrutura otimizada com o valor especificado para a perda de retorno, $P^{obj} = -45dB$, considerando-se N = 2, 3 e 4 seções de guias de onda intermediárias que constituem o acoplador. As Tabelas 4.2, 4.3 e 4.4 listam as dimensões das estruturas iniciais e otimizadas para N = 2, 3 e 4 seções de guias de outra sector de guias de onda intermediárias que constituem o acoplador. As Tabelas 4.2, 4.3 e 4.4 listam as dimensões das estruturas iniciais e otimizadas para N = 2, 3 e 4 seções de guias de outra de sector de sec

Observa-se que, para N = 3 e 4 seções de guias de onda coaxiais, o desempenho da estrutura para a perda de retorno está abaixo de -40dB. Entretanto, o caso onde N = 3 oferece maior praticidade na usinagem do dispositivo.

Seção de guia	Estrutura inicial			Estrutura otimizada		
de onda coaxial	A(mm)	B(mm)	L (mm)	A(mm)	B(mm)	L(mm)
Seção 2	1.95	4.60	4.10	1.95	4.60	8.61
Seção 3	2.41	5.75	15.90	2.41	5.75	11.38

Tabela 4.2 – Dimensões da estrutura inicial e otimizada para o acoplador com duas seções de guias de onda intermediárias compondo o acoplador, N = 2 e $L_T = 20mm$.

Seção de guia	Es	Estrutura inicial		Estrutura otimizada		
de onda coaxial	A(mm)	B(mm)	L(mm)	A(mm)	B(mm)	L(mm)
Seção 2	1.88	4.60	2.65	1.61	4.60	2.20
Seção 3	2.37	5.50	5.50	2.38	5.50	5.14
Seção 4	2.66	6.40	11.84	2.70	6.40	12.67

Tabela 4.3 – Dimensões da estrutura inicial e otimizada para o acoplador com três seções de guias de onda intermediárias compondo o acoplador, N = 3 e $L_T = 20mm$.

Socão do quia	Estrutura inicial			Estrutura otimizada		
de onda coaxial	A(mm)	B(mm)	L(mm)	A(mm)	B(mm)	L(mm)
Seção 2	1.91	4.40	1.65	1.60	4.40	1.65
Seção 3	2.24	5.15	3.53	2.16	5.15	3.53
Seção 4	2.54	5.85	4.97	2.52	5.85	4.97
Seção 5	2.84	6.50	9.83	2.77	6.50	9.83

Tabela 4.4 – Dimensões da estrutura inicial e otimizada para o acoplador com quatro seções de guias de onda intermediárias compondo o acoplador, N = 4 e $L_T = 20mm$.



Figura 4.12 – Comparação do $|S11_{00}|(dB)$ da estrutura inicial de otimização e da estrutura otimizada com o valor especificado para a perda de retorno, $P^{obj} = -45dB$, considerando-se acopladores com (a) N = 2 (b) N = 3 e (c) N = 4 seções de guias de onda intermediárias compondo a estrutura, sendo $L_T = 20mm$.

Observa-se que, para N = 3 e 4 seções de guias de onda coaxiais, o desempenho da estrutura para a perda de retorno está abaixo de -42dB. Entretanto, o caso com N = 3 oferece maior praticidade na usinagem do dispositivo.

Seção de guia	Estrutura inicial			Estrutura otimizada		
de onda coaxial	A(mm)	B(mm)	L (mm)	A(mm)	B(mm)	L(mm)
Seção 2	1.95	4.60	6.15	1.98	4.60	25.50
Seção 3	2.41	5.75	23.85	2.26	5.75	4.50

Tabela 4.5 - Dimensões da estrutura inicial e otimizada para o acoplador com duas seções de guias de onda intermediárias compondo o acoplador, N = 2 e $L_T = 30mm$.

Seção de guia	Estrutura inicial			Estrutura otimizada		
de onda coaxial	A(mm)	B(mm)	L(mm)	A(mm)	B(mm)	L(mm)
Seção 2	1.88	4.60	3.98	1.61	4.60	2.46
Seção 3	2.37	5.50	8.25	2.39	5.50	6.88
Seção 4	2.66	6.40	17.77	2.72	6.40	20.66

Tabela 4.6 – Dimensões da estrutura inicial e otimizada para o acoplador com três seções de guias de onda intermediárias compondo o acoplador, N = 3 e $L_T = 30mm$.

Seção de guia de onda coaxial	Estrutura inicial			Estrutura otimizada		
	A(mm)	B(mm)	L(mm)	A(mm)	B(mm)	L(mm)
Seção 2	1.91	4.40	2.48	1.61	4.40	4.02
Seção 3	2.24	5.15	5.23	2.39	5.15	6.50
Seção 4	2.54	5.85	7.46	2.34	5.85	7.78
Seção 5	2.84	6.50	14.75	2.82	6.50	11.70

Tabela 4.7 – Dimensões da estrutura inicial e otimizada para o acoplador com quatro seções de guias de onda intermediárias compondo o acoplador, N = 4 e $L_T = 30mm$.



Figura 4.13 – Comparação do $|S11_{00}|(dB)$ da estrutura inicial de otimização e da estrutura otimizada com o valor especificado para a perda de retorno, $P^{obj} = -45dB$, considerando-se acopladores com (a) N = 2 (b) N = 3 e (c) N = 4 seções de guias de onda intermediárias compondo a estrutura, sendo $L_T = 30mm$.

4.2.3. Comparação entre Simulações e Medidas para Perda de Retorno

Nesta seção, serão mostrados os resultados de uma comparação entre os valores do módulo da perda de retorno, obtidos através de medida e simulação numérica. Para essa comparação, será utilizado o acoplador mostrado na Figura 4.2, para $L_1 = L_2 = 10mm$. É importante lembrar que esse acoplador foi dimensionado para alimentar uma antena discone através de um conector coaxial do tipo N. Tanto o conector do tipo N quanto o guia coaxial conectado à antena são representados por guias coaxiais infinitos de impedância característica de 50 Ω , com dimensões distintas. Por outro lado, para realizar as medidas de perda de retorno é necessário que o acoplador seja conectado a uma carga padrão de 50 Ω através de conectores do tipo N.

Para contornar essa dificuldade, será utilizada a estrutura coaxial simétrica ilustrada na Figura 4.14, na qual a primeira metade é idêntica à mostrada na Figura 4.2 e $L_3 = 10mm$. Nesse conjunto, as terminações são equivalentes aos conectores do Tipo N necessários para a realização das medidas. Dada a simetria da estrutura e as propriedades de reciprocidade, as metades, isoladamente, deverão apresentar um comportamento idêntico para o módulo da perda de retorno, fazendo com que o desempenho do conjunto em algumas freqüências esteja 3dB acima do previsto na seção anterior com relação a apenas uma das metades.



Figura 4.14 – Estrutura de acoplamento simétrica.

Como ilustrado na Figura 4.15, para essa estrutura, foi utilizado o mesmo artifício do deslocamento no condutor central descrito no item anterior. Observase que, um deslocamento G para a direita em uma metade implica que a outra será equivalente a uma estrutura que apresenta um deslocamento para a esquerda.



Figura 4.15 – Estrutura de acoplamento simétrica após a inclusão do deslocamento no condutor central.

Na faixa de freqüência de 0.8 a 3.6 GHz, a Figura 4.16 ilustra os resultados obtidos nas medidas e na simulação para o dispositivo mostrado na Figura 4.14. Os resultados da simulação foram gerados para $G = 10^{-3} mm$, utilizando-se 20 modos TM na representação dos campos em cada seção de guia liso, podendo-se, então, estimar o comportamento do acoplador alinhado. Os valores obtidos para a perda de retorno apresentam discrepâncias da ordem de 3dB entre medida e simulação. Entretanto, essas discrepâncias situadas no início da banda passante ocorrem abaixo de -32dB, sendo consideradas pequenas em valor absoluto, fora da escala de dB, podendo ser atribuídas aos erros de construção e montagem, como o deslocamento dos cilindros condutores mencionado anteriormente.



Figura 4.16 – Comparação entre $|S11_{00}|(dB)$, obtido nas medidas, e simulação para o dispositivo da figura 4.14, considerando-se $L_1 = L_2 = L_3 = 10mm$.

Para avaliar adequadamente a influência do deslocamento nas discrepâncias entre os resultados da medida e da simulação numérica via Método de Casamento de Modos, é mostrado, na Figura 4.17, o desempenho de $|S11_{00}|(dB)$ da estrutura ilustrada na Figura 4.15, considerando-se diversos valores de deslocamento *G* entre os cilindros condutores interno e externo. Esses valores foram escolhidos dentro da precisão mecânica de montagem, ou seja, de 0.1 a 1.0 mm. Considerando-se as limitações na medida para valores menores que -35 dB, observa-se discrepâncias menores que -2dB entre a medida e as simulações, para G entre 0.3 e 0.4 mm. Outro ponto importante na análise desses resultados, é o fato de que, à medida que *G* aumenta, desaparece o nulo situado em aproximadamente 1.6GHz na simulação da estrutura alinhada, tendendo para os valores da medida.



Figura 4.17 – Comparação entre $|S11_{00}|(dB)$, obtido nas medidas, e simulações para o dispositivo da figura 4.15, considerando-se $L_1 = L_2 = L_3 = 10mm$ e *G* variando de 0.1 a 1mm.

4.3. Segunda estrutura de acoplamento

Para este segundo exemplo, considerou-se a mesma configuração de estrutura de acoplamento do item anterior com três seções de guias de onda coaxiais na composição do dispositivo, cujas dimensões foram obtidas na otimização do segundo caso e encontram-se listadas na Tabela 4.6. Porém, foram incluídos nessa estrutura de acoplamento dois anéis dielétricos, que têm

como objetivo centralizar o cilindro condutor interno e também contribuir no aumento da rigidez mecânica da estrutura sem perturbar o desempenho elétrico do dispositivo acoplador.

Um ponto importante a ser considerado na inclusão desses anéis dielétricos é o posicionamento dos mesmos. As figuras 4.18.(a) e (b) ilustram dois casos em que esse posicionamento foi feito de forma a favorecer a construção e montagem do dispositivo, obtendo-se uma melhor configuração de rigidez da peça.



Figura 4.18 – Estrutura de acoplamento entre dois guias de onda coaxiais de dimensões diferentes, com anéis dielétricos (a) depois e (b) antes e depois do acoplador.

Considerou-se o mesmo artifício do deslocamento descrito no item anterior para ambas as estruturas de acoplamento ilustradas nas Figuras 4.18.(a) e (b), de forma a contornar as limitações teóricas discutidas no item 4.2, onde utilizouse $G = 10^{-3} mm$ e 20 modos TM para o calculo das matrizes de espalhamento.

Inicialmente, será feita a análise do acoplador ilustrado na Figura 4.18.(a). O conjunto de Figuras 4.19.(a)-(c) ilustra o comportamento de $|S11_{00}|(dB)$ para essa estrutura de acoplamento, com dimensões das seções de guia de onda listadas na tabela 4.8, considerando-se $Ld_1 = Ld_2 = Ld = 1$, 2 e 3mm, onde, para cada valor da espessura dos anéis dielétricos, analisou-se o desempenho da estrutura para três valores de D. Observa-se que se, por um lado, valores maiores de Ld melhoram a rigidez mecânica da estrutura pelo aumento da espessura do anel dielétrico, por outro, ele contribui para o aumento da perda de retorno.

Seção de guia de onda coaxial	A(mm)	B(mm)	L(mm)
Seção 2	1.61	4.60	2.46
Seção 3	2.39	5.50	6.88
Seção 4	2.72	6.40	20.66

Tabela 4.8 – Dimensões das seções de guias de onda coaxiais referentes à estrutura de acoplamento ilustrada na Figura 4.18.(a) e (b).



Figura 4.19 – $|S11_{00}|(dB)$ para a estrutura de acoplamento ilustrada na Figura 4.18(a), para (a) Ld = 1mm, (b) Ld = 2mm e (c) Ld = 3mm.

Para otimizar o desempenho desse acoplador, será ajustada a distância entre os anéis *D* utilizando-se o algoritmo de otimização descrito no item 4.2.1. Considerando-se, como ponto de partida, D = 6cm para os três valores de *Ld*.

O conjunto de Figuras 4.20.(a)-(c) compara o comportamento de $|S11_{00}|(dB)$ para a estrutura inicial de otimização e para a estrutura otimizada com o valor especificado para a perda de retorno, $P^{obj} = -45dB$. Após a otimização, foram obtidos D = 5.976, 5.663 e 6.064cm para Ld = 1, 2 e 3mm respectivamente.



Figura 4.20 - Comparação do $|S11_{00}|(dB)$ da estrutura inicial de otimização e da estrutura otimizada com o valor especificado para a perda de retorno, $P^{obj} = -45dB$, considerando-se (a) Ld = 1mm, (b) Ld = 2mm e (c) Ld = 3mm para a estrutura de acoplamento ilustrada na Figura 4.18(a).

Visto que, não se consegue chegar a baixas perdas de retorno através do ajuste de *D* da estrutura ilustrada na Figura 4.18(a), será gerado um novo conjunto de otimizações. Nesse conjunto, serão ajustados, além de *D*, os raios dos condutores internos da segunda, terceira e quarta seção de guia de onda, os comprimentos dessas seções em função de γ^B e dos raios dos cilindros condutores externos, como descrito no item 4.2.2, e o comprimento total da estrutura de acoplamento, $L_T = L_1 + L_2 + L_3$. Será utilizado, como ponto inicial, as estruturas resultantes da primeira otimização. As dimensões das seções de guia de onda resultantes desse segundo caso estão listadas nas Tabelas 4.9, 4.10 e 4.11, onde obteve-se D = 7.99, 7.33 e 7.10cm para Ld = 1, 2 e 3mm, respectivamente.

O conjunto de Figuras 4.21.(a)-(c) compara o comportamento de $|S11_{00}|(dB)$ para a estrutura inicial de otimização e para a estrutura otimizada com o valor especificado para a perda de retorno, $P^{obj} = -45dB$. Observa-se que, para essa disposição dos anéis dielétricos, o melhor caso, onde Ld = 1mm, apresenta perdas abaixo de -26dB, ou seja, acima dos -35dB especificados no item 4.1. Além disso, o mesmo não oferece uma boa rigidez mecânica.

Seção de guia de onda coaxial	A(mm)	B(mm)	L(mm)
Seção 2	0.50	4.60	1.98
Seção 3	3.23	5.50	3.58
Seção 4	2.40	6.40	14.44

Tabela 4.9 – Dimensões das seções de guias de onda coaxiais resultantes da segunda etapa de otimização, para Ld = 1mm, referentes à estrutura de acoplamento ilustrada na Figura 4.18.(a).

Seção de guia de onda coaxial	A(mm)	B(mm)	L(mm)
Seção 2	0.50	4.60	2.62
Seção 3	3.36	5.50	4.44
Seção 4	2.32	6.40	16.54

Tabela 4.10 – Dimensões das seções de guias de onda coaxiais resultantes da segunda etapa de otimização, para Ld = 2mm, referentes à estrutura de acoplamento ilustrada na Figura 4.18.(a).

Seção de guia de onda coaxial	A(mm)	B(mm)	L(mm)
Seção 2	0.50	4.60	3.17
Seção 3	3.58	5.50	4.55
Seção 4	2.01	6.40	13.80

Tabela 4.11 – Dimensões das seções de guias de onda coaxiais resultantes da segunda etapa de otimização, para Ld = 3mm, referentes à estrutura de acoplamento ilustrada na Figura 4.18.(a).



Figura 4.21 - Comparação do $|S11_{00}|(dB)$ da estrutura inicial de otimização e da estrutura otimizada, referentes a segunda etapa de otimização, com o valor especificado para a perda de retorno, $P^{obj} = -45dB$, considerando-se (a) Ld = 1mm, (b) Ld = 2mm e (c) Ld = 3mm para a estrutura de acoplamento ilustrada na Figura 4.18(a).

No desenvolvimento que segue, será analisado o comportamento da estrutura ilustrada na Figura 4.18.(b), buscando-se chegar a resultados melhores que os da estrutura analisada anteriormente com relação à perda de retorno ao longo da banda passante. O conjunto de Figuras 4.22.(a)-(c) ilustra o comportamento de $|S11_{00}|(dB)$ para essa estrutura de acoplamento, cujas dimensões das seções de guia de onda estão listadas na tabela 4.8, considerando-se $Ld_1 = Ld_2 = Ld = 1$, 2 e 3mm. Para cada valor da espessura dos anéis dielétricos, analisou-se o desempenho da estrutura para três valores de D.



Figura 4.22 – $|S11_{00}|(dB)$ para a estrutura de acoplamento ilustrada na Figura 4.18(b), para (a) Ld = 1mm, (b) Ld = 2mm e (c) Ld = 3mm.

Para otimizar o desempenho desse acoplador, será ajustada a distância entre os anéis *D*, utilizando-se o algoritmo de otimização descrito no item 4.2.1, considerando-se, como ponto de partida, D = 8cm para os três valores de *Ld*.

O conjunto de Figuras 4.23.(a)-(c) compara o comportamento de $|S11_{00}|(dB)$ para a estrutura inicial de otimização e para a estrutura otimizada, onde obteve-se $D \cong 0$ para os três valores de Ld, com o valor especificado para a perda de retorno, $P^{obj} = -45dB$. Observa-se que o ajuste de D diminuiu a perda de retorno em grande parte da banda passante, porém, aumentando-se no fim, nos três casos.



Figura 4.23 - Comparação do $|S11_{00}|(dB)$ da estrutura inicial de otimização e da estrutura otimizada, com o valor especificado para a perda de retorno, $P^{obj} = -45dB$, considerando-se (a) Ld = 1mm, (b) Ld = 2mm e (c) Ld = 3mm para a estrutura de acoplamento ilustrada na Figura 4.18(b).

Mais uma vez, será gerado um novo conjunto de otimizações, onde serão ajustados, além de *D*, os raios dos condutores internos da segunda, terceira e

93

quarta seção de guia de onda, os comprimentos dessas seções em função de γ^{B} e dos raios dos cilindros condutores externos, como descrito no item 4.2.2, e o comprimento total da estrutura de acoplamento, $L_{T} = L_{1} + L_{2} + L_{3}$. Será utilizado, como ponto inicial, as estruturas resultantes da primeira otimização. As dimensões das seções de guia de onda resultantes desse segundo caso estão listadas nas Tabelas 4.12, 4.13 e 4.14, onde obteve-se D = 0 para Ld = 1, 2 e 3mm, respectivamente.

O conjunto de Figuras 4.24.(a)-(c) compara o comportamento de $|S11_{00}|(dB)$ para a estrutura inicial de otimização e para a estrutura otimizada, para Ld = 1, 2 e 3mm, com o valor especificado para a perda de retorno, $P^{obj} = -45dB$. Observa-se que o ajuste de D diminuiu a perda de retorno em grande parte da banda passante, porém, aumentando-se no fim, nos três casos. Observa-se que para esta disposição dos anéis dielétricos, consegui-se perdas abaixo de -41dB para Ld = 1 e 2mm. Entretanto, o caso onda Ld = 2mm oferece maior rigidez mecânica para o acoplador.

Seção de guia de onda coaxial	A(mm)	B(mm)	L(mm)
Seção 2	0.50	4.60	2.24
Seção 3	3.13	5.50	3.78
Seção 4	2.46	6.40	13.97

Tabela 4.12 – Dimensões das seções de guias de onda coaxiais resultantes da segunda etapa de otimização, para Ld = 1mm, referentes à estrutura de acoplamento ilustrada na Figura 4.18.(b).

Seção de guia de onda coaxial	A(mm)	B(mm)	L(mm)
Seção 2	1.54	4.60	9.45
Seção 3	3.27	5.50	5.09
Seção 4	1.15	6.40	5.42

Tabela 4.13 – Dimensões das seções de guias de onda coaxiais resultantes da segunda etapa de otimização, para Ld = 2mm, referentes à estrutura de acoplamento ilustrada na Figura 4.18.(b).

Seção de guia de onda coaxial	A(mm)	B(mm)	L(mm)
Seção 2	0.66	4.60	4.89
Seção 3	3.60	5.50	4.97
Seção 4	1.71	6.40	10.13

Tabela 4.14 – Dimensões das seções de guias de onda coaxiais resultantes da segunda etapa de otimização, para Ld = 3mm, referentes à estrutura de acoplamento ilustrada na Figura 4.18.(b).



Figura 4.24 - Comparação do $|S11_{00}|(dB)$ da estrutura inicial de otimização e da estrutura otimizada, referentes a segunda etapa de otimização, com o valor especificado para a perda de retorno, $P^{obj} = -45dB$, considerando-se (a) Ld = 1mm, (b) Ld = 2mm e (c) Ld = 3mm para a estrutura de acoplamento ilustrada na Figura 4.18(b).

4.4. Terceira estrutura de acoplamento

Nesta seção, será apresentado o projeto de um tipo de acoplador construído a partir da combinação das estruturas mostradas nos itens 3.4.1 e 3.4.2, que apresentam, isoladamente, baixas perdas de retorno ao longo da banda passante.



Figura 4.25 - Estrutura de acoplamento baseada na combinação das estruturas dos itens 3.4.1 e 3.4.2.

A Figura 4.25 ilustra essa combinação, que é composta de dois anéis dielétricos nos extremos do acoplador e uma seção de transição no centro. A utilização de dois anéis dielétricos tem a finalidade de aumentar a estabilidade mecânica da estrutura e facilitar a centralização do cilindro condutor interno.

Inicialmente, as dimensões das seções de guia de onda que cercam os anéis e da seção de transição serão dimensionadas separadamente. Posteriormente, elas serão justapostas e a distância entre as seções, $D_1 \in D_2$, serão ajustadas para adequar o desempenho da perda de retorno da estrutura de acoplamento completa ao longo da banda de 0.8 a 4GHz, considerando-se 20 modos TM para cada seção de guia de onda no cálculo das matrizes de espalhamento.

4.4.1. Dimensionamento das Estruturas de Suporte Mecânico

A Figura 4.26 ilustra as variáveis envolvidas no dimensionamento dos suportes mecânicos utilizados nos dois guias coaxiais a serem acoplados. A Tabela 4.15 lista as dimensões que caracterizam as duas estruturas. Para explorar o comportamento eletromagnético dos suportes mecânicos formados pelos anéis dielétricos, os raios dos cilindros condutores internos e externos de cada seção do suporte mantêm, inicialmente, a relação utilizada no dimensionamento do exemplo apresentado na seção 3.4.2. Considerou-se que são idênticos os comprimentos $L_1 = L_2 = L_3 = L_N$ das três seções de guia que envolvem cada suporte.



Figura 4.26 – Estrutura de suporte.

	Primeiro suporte	Segundo suporte
Seção de guia de onda coaxial	A (mm)	A (mm)
Seção 2	0.80	1.50
Seção 3	1.60	3.10
Seção 4	0.80	1.50



Para o primeiro e segundo suportes, as Figuras 4.27.(a) e (b) mostram, respectivamente, o comportamento de $|S11_{00}|(dB)$ ao longo da banda passante, considerando-se $L_N = 1$, 2 ou 3mm. Observa-se que, se, por um lado, valores maiores de L_N melhoram a rigidez mecânica pelo aumento da espessura do anel dielétrico, por outro, eles contribuem para o aumento da perda de retorno.



Figura 4.27 – $|S11_{00}|(dB)$ (a) para o primeiro suporte e (b) para o segundo suporte ilustrados na Figura 4.26.

Para otimizar o desempenho dos suportes mecânicos, foi utilizado o método de otimização descrito na seção 4.2.1, onde serão ajustados os raios dos cilindros condutores internos, $A_2 \in A_4$, e também os comprimentos $L_1 \in L_3$ da estrutura ilustrada na figura 4.26. Serão usados, como ponto inicial de otimização, os valores listados na Tabela 4.15 e $L_1 = L_3 = 3mm$, nos dois suportes. A otimização será realizada considerando três valores da espessura do anel dielétrico, $L_2 = I$, $2 \in 3mm$. As dimensões resultantes das três otimizações para a primeira e para a segunda estrutura de suporte estão listadas nas Tabelas 4.16 e 4.17, respectivamente.

	Prin otimi	neira zação	Segi otimiz	unda zação	Tero otimiz	ceira zação
Seção de guia de onda coaxial	A (mm)	L (mm)	A (mm)	L (mm)	A (mm)	L (mm)
Seção 2	1.15	1.42	0.77	1.54	0.50	1.59
Seção 3	1.60	1.00	1.60	2.00	1.60	3.00
Seção 4	1.24	1.68	0.73	1.48	0.50	1.59

Tabela 4.16 – Dimensões resultantes dos três casos otimizados, $L_2 = 1$, 2 e 3mm, para a primeira estrutura de suporte mecânico.

	Primeira otimização		Segunda otimização		Terceira otimização	
Seção de guia de onda coaxial	A (mm)	L (mm)	A (mm)	L (mm)	A (mm)	L (mm)
Seção 2	2.66	2.58	1.60	1.81	0.50	1.06
Seção 3	3.10	1.00	3.10	2.00	3.10	3.00
Seção 4	2.36	2.15	1.37	1.56	0.50	1.10

Tabela 4.17 – Dimensões resultantes dos três casos otimizados, $L_2 = 1$, 2 e 3mm, para a segunda estrutura de suporte mecânico.

Para a primeira e segunda estruturas de suporte otimizadas, as Figuras 4.28.(a) e (b) comparam, respectivamente, o comportamento de $|S11_{00}|(dB)$ para a estrutura inicial de otimização e para a estrutura otimizada com o valor especificado para a perda de retorno, $P^{obj} = -50dB$. Como observado nesse conjunto de resultados, a perda de retorno diminui com a redução da espessura do dielétrico L_2 , porém, isso compromete a rigidez mecânica da estrutura. As soluções ótimas para $L_2 = I$ e 2*mm* foram capazes de atender às especificações de -50dB para a perda de retorno para cada um dos suportes, isoladamente.

Dos valores listados nas Tabelas 4.16 e 4.17 observa-se que, se, por um lado a rigidez mecânica oferecida pela espessura do dielétrico aumenta com o uso de L_2 maior, por outro, as soluções ótimas indicam um aprofundamento das cavidades pela diminuição de A, o que enfraquece o cilindro interno e



Figura 4.28 - Comparação entre $|S11_{00}|(dB)$ da estrutura inicial de otimização e da estrutura otimizada e o valor especificado para a perda de retorno, $P^{obj} = -50dB$, (a) para o primeiro suporte e (b) para o segundo suporte, ilustrados na Figura 4.26.

4.4.2. Dimensionamento da Estrutura de Transição

Para o dimensionamento da estrutura de transição entre o guia de onda coaxial proveniente do conector e o guia de onda coaxial de entrada da antena, ilustrada na Figura 4.29, será analisado apenas a influência do parâmetro L_G sobre $|S11_{00}|(dB)$.



Figura 4.29 – Estrutura de transição entre dois guias de onda coaxiais de dimensões distintas.

A Figura 4.30 mostra os valores de $|S11_{00}|(dB)$ para a estrutura de transição, considerando-se diversos valores de L_G . Observa-se que, à medida que aumenta-se o comprimento L_G , a perda de retorno diminui. Entretanto, para L_G maior que 1.5mm, a perda começa a aumentar. Portanto, estima-se que exista um valor ótimo para L_G entre 1.5 e 2mm.



Figura 4.30 – $|S11_{00}|(dB)$ para a estrutura de transição ilustrada na Figura 4.29.

Para otimizar o desempenho da estrutura de transição, foi utilizado o método de otimização descrito na seção 4.2.1. Será ajustado o comprimento L_G da estrutura ilustrada na figura 4.29, utilizando-se como valor inicial $L_G = 1.5mm$.

A Figura 4.31 compara o comportamento de $|S11_{00}|(dB)$ para a estrutura inicial de otimização e para a estrutura otimizada, onde $L_G = 1.66 mm$, com o valor especificado para a perda de retorno, $P^{obj} = -50 dB$. Observa-se que os valores mínimos obtidos pela solução ótima estão muito acima da perda de retorno pré-estabelecida como objetivo. Isso ocorre devido à grande diferença entre as dimensões do guia de onda coaxial proveniente do conector e as do guia de onda coaxial de entrada da antena. Porém, esses valores estão abaixo de -35dB.



Figura 4.31 – Comparação entre $|S11_{00}|(dB)$ da estrutura inicial de otimização e da estrutura otimizada e o valor especificado para a perda de retorno, $P^{obj} = -50dB$, referentes à estrutura de transição ilustrada na Figura 4.29.

4.4.3. Dimensionamento da Estrutura de Acoplamento Completa

Para explorar o comportamento eletromagnético da estrutura de acoplamento completa, serão consideradas, inicialmente, as dimensões associadas às soluções otimizadas isoladamente, dadas por $L_2 = 2mm$, para os suportes, e $L_G = 1.66mm$, para a estrutura de transição, como listado na Tabela 4.18.

Seção de guia De onda coaxial	A (mm)	L (mm)
Seção 2	0.77	1.54
Seção 3	1.60	2.00
Seção 4	0.73	1.48
Seção 5	1.60	D_1
Seção 6	1.60	1.66
Seção 7	3.10	D_2
Seção 8	1.60	1.81
Seção 9	3.10	2.00
Seção 10	1.37	1.56

Tabela 4.18 – Dimensões da estrutura inicial de otimização para o acoplador completo, ilustrado na Figura 4.25.

A partir dessas dimensões, a Figura 4.32 mostra os valores de $|S11_{00}|(dB)$ obtidos para diversos valores de $D_1 = D_2 = D$.



Figura 4.32 – $|S11_{00}|(dB)$ para o acoplador ilustrado na Figura 4.25.

Para otimizar o desempenho do acoplador completo, as distâncias D_1 e D_2 foram ajustadas, para minimizar as perdas de retorno, utilizando-se o algoritmo de otimização descrito na seção 4.2.1 e considerando-se, como ponto de partida, $D_1 = D_2 = 2cm$.

A Figura 4.33 compara o comportamento de $|S11_{00}|(dB)$ para a estrutura inicial de otimização e para a estrutura otimizada, onde $D_1 = 1.55cm$ e $D_2 = 8.0cm$, com o valor especificado para a perda de retorno, $P^{obj} = -50dB$.

Apesar dos valores máximos de $|S11_{00}|(dB)$ para as soluções inicial e ótima serem próximos entre si e bem acima do estabelecido como meta, observa-se que o ajuste de D_1 e D_2 permitiu uma redução de até 5dB em alguns intervalos.



Figura 4.33 – Comparação entre $|S11_{00}|(dB)$ da estrutura inicial de otimização e da estrutura otimizada e o valor especificado para a perda de retorno, $P^{obj} = -50dB$, referentes à estrutura de acoplamento ilustrada na Figura 4.25.

Entretanto, pode-se chegar a uma configuração das dimensões desse acoplador que melhore o desempenho da perda de retorno através de uma segunda otimização, na qual serão ajustadas todas as dimensões que constituem esse dispositivo, adotando-se, como estrutura inicial de otimização, a estrutura otimizada anteriormente, com $D_1 = 1.55cm$ e $D_2 = 8.0cm$. Para essa configuração, foram otimizados todos os comprimentos das seções de guias de onda coaxiais e os raios dos cilindros condutores internos das segunda, quarta, oitava e décima seções de guias de onda coaxiais lisos, A_2 , A_4 , A_8 e A_{10} , respectivamente, referentes à estrutura ilustrada na Figura 4.25. As dimensões resultantes dessa segunda etapa de otimização estão listadas na Tabela 4.19.

A Figura 4.34 compara o comportamento de $|S11_{00}|(dB)$ para a estrutura inicial de otimização e para a estrutura otimizada com o valor especificado para a perda de retorno, $P^{obj} = -50dB$. Os dados mostram uma perda de retorno abaixo de -49dB em 85% da banda passante, porém, revelam um pico de -41dB no início da banda.

Seção de guia de onda coaxial	A (mm)	L (mm)
Seção 2	0.82	2.48
Seção 3	1.60	3.20
Seção 4	0.50	1.94
Seção 5	1.60	15.65
Seção 6	1.60	1.63
Seção 7	3.10	58.98
Seção 8	1.65	2.04
Seção 9	3.10	2.08
Seção 10	1.82	2.14

Tabela 4.19 – Dimensões resultantes do segundo caso de otimização da estrutura de acoplamento completa referente à Figura 4.25.



Figura 4.34 – Comparação entre $|S11_{00}|(dB)$ da estrutura inicial de otimização e da estrutura otimizada, referente à segunda de otimização, e o valor especificado para a perda de retorno, $P^{obj} = -50dB$, da estrutura de acoplamento ilustrada na Figura 4.25.

A perda de retorno no início da banda, resultante da otimização anterior e ilustrada na Figura 4.34, pode ser reduzida através do aumento do parâmetro q da função objetivo, definida no item 4.2.2, e, também, da diminuição do valor especificado para P^{obj} . Busca-se, com isso, ajustar as dimensões do dispositivo, de forma que a nova configuração consiga uma perda de retorno mais plana ao longo da banda passante, diminuindo no início e, eventualmente,

aumentando no restante da banda. Isso seria possível, pois, aumentando q, aumentaria a influência dos valores maiores para a perda de retorno ao longo da banda. A partir dessas considerações, será feita uma terceira etapa de otimização, na qual a estrutura inicial será a resultante da segunda etapa e serão ajustadas as mesmas variáveis, considerando-se q = 4 e $P^{obj} = -45 dB$. As dimensões resultantes dessa terceira etapa de otimização estão listadas na Tabela 4.20.

A Figura 4.35 compara o comportamento de $|S11_{00}|(dB)$ para a estrutura inicial de otimização e para a estrutura otimizada com o valor especificado para a perda de retorno, $P^{obj} = -45dB$. Os dados mostram uma redução de 1.2dB na perda de retorno no início da banda comparada com a perda da estrutura inicial de otimização.

Seção de guia de onda coaxial	A (mm)	L (mm)
Seção 2	1.15	3.85
Seção 3	1.60	3.05
Seção 4	0.50	1.91
Seção 5	1.60	16.43
Seção 6	1.60	1.63
Seção 7	3.10	64.61
Seção 8	0.96	1.00
Seção 9	3.10	2.00
Seção 10	0.85	1.00

Tabela 4.20 – dimensões resultantes do terceiro caso de otimização da estrutura de acoplamento completa referente à Figura 4.25.



Figura 4.35 – Comparação entre $|S11_{00}|(dB)$ da estrutura inicial de otimização e da estrutura otimizada, referente a terceira etapa de otimização, e o valor especificado para a perda de retorno, $P^{obj} = -45dB$, da estrutura de acoplamento ilustrada na Figura 4.25.

4.5. Quarta estrutura de acoplamento

No caso anterior, conseguiu-se baixa perda de retorno ao longo da banda passante após a otimização da estrutura de acoplamento ilustrada na Figura 4.25. Porém, como observado na Tabela 4.20, as dimensões dos raios dos condutores internos, *A*, resultantes da otimização geral da estrutura de acoplamento, ficaram muito pequenas onde o quarto guia de onda coaxial liso apresentou $A_4 = 0.5mm$, tornando o cilindro condutor interno frágil e de difícil construção.

Nesta seção, será estudado um caso semelhante ao anterior, porém, o salto que reduz as perdas após a inclusão do anel dielétrico em cada suporte será feito no cilindro condutor externo, como ilustrado na Figura 4.36. A estrutura de transição será a mesma da seção anterior, descrita no item 4.4.2.

A seqüência de análises será semelhante à desenvolvida na seção anterior, onde, inicialmente, as dimensões dos guias que cercam os anéis dielétricos serão dimensionadas separadamente. Posteriormente, as estruturas de suporte e a estrutura de transição serão justapostas e a distância entre as seções, D_1 e D_2 , serão ajustadas para adequar o desempenho da perda de retorno da estrutura de acoplamento completa ao longo da banda de 0.8 a 4GHz, considerando 20 modos TM para cada seção de guia de onda no cálculo das matrizes de espalhamento.



Figura 4.36 - Estrutura de acoplamento remodelada baseada no item 4.4.

4.5.1. Dimensionamento das Estruturas de Suporte Mecânico

A Figura 4.37 ilustra as variáveis envolvidas no dimensionamento dos suportes mecânicos utilizados nos dois guias de onda coaxiais a serem acoplados. O dimensionamento desses suportes será feito considerando B_3 igual ao raio do cilindro condutor externo da primeira e última seção, $B_2 = B_4 = B_N$ e $L_1 = L_2 = L_3 = L_N$.



Figura 4.37 – Estrutura de suporte remodelada.

Suporte do Guia de Onda Coaxial de Saída do Conector

O conjunto de Figuras 4.38.(a)-(c) ilustra o comportamento de $|S11_{00}|(dB)$ para a estrutura ilustrada na Figura 4.37, referente ao primeiro suporte, considerando $L_N = 1$, 2 ou 3mm, onde, para cada valor de L_N , analisou-se o desempenho da estrutura para vários valores de B_N , sendo $B_3 = 3.7mm$. Observa-se que, para $L_N = 1$ e 2mm, pode existir um valor ótimo para B_N entre 6.7 e 6.8mm e, para $L_N = 3mm$, estima-se que o valor ótimo para B_N esteja entre 7.1 e 7.2mm. Observa-se também que, se por um lado o aumento de L_N melhora a rigidez mecânica, por outro ele contribui para o aumento da perda de retorno.



Figura 4.38 – $|S11_{00}|(dB)$ para o primeiro suporte, ilustrado na Figura 4.37, para (a) $L_N = 1mm$, (b) $L_N = 2mm$ e (c) $L_N = 3mm$.

Para otimizar o desempenho dessa estrutura de suporte mecânico, foi utilizado o método de otimização descrito na seção 4.2.1, onde serão ajustados os raios dos cilindros condutores externos, B_2 , B_3 e B_4 , e também os comprimentos L_1 e L_3 da estrutura ilustrada na Figura 4.37. Serão considerados dois casos de otimização.

No primeiro caso, serão utilizadas como dimensões iniciais $L_N = 2mm$ e $B_N = 6.7mm$. Essas dimensões são referentes à estrutura com desempenho ilustrado na Figura 4.38.(b). A otimização será realizada considerando-se como valor da espessura do anel dielétrico, $L_2 = 2mm$.

No segundo caso, serão utilizadas como dimensões iniciais $L_N = 3mm$ e $B_N = 7.1mm$. Essas dimensões são referentes à estrutura com desempenho ilustrado na Figura 4.38.(c), onde nesse caso, $L_2 = 3mm$.

A estrutura analisada anteriormente, com dimensões $L_N = 1mm$ e $B_N = 6.7mm$, não será otimizada, visto que essa estrutura apresenta perda de retorno abaixo de -70dB e o anel de dielétrico com 1mm de espessura não oferece uma boa rigidez mecânica.

As dimensões resultantes dos dois casos otimizados são listadas na Tabela 4.21.

	Primeira	otimização	Segunda	otimização
Seção de guia de onda coaxial	B (mm)	L (mm)	B (mm)	L (mm)
Seção 2	7.01	1.81	6.28	1.72
Seção 3	3.74	2.00	4.47	3.00
Seção 4	7.01	1.81	6.28	1.72

Tabela 4.21 – Dimensões resultantes dos dois casos otimizados, $L_2 = 2 e 3mm$, para a primeira estrutura de suporte mecânico.

Para o primeiro e segundo caso otimizados, as Figuras 4.39.(a) e (b) comparam, respectivamente, o comportamento de $|S11_{00}|(dB)$ para a estrutura

inicial de otimização e para a estrutura otimizada com o valor especificado para a perda de retorno, $P_f^{obj}(x) = -50 dB$. Como observado nesse conjunto de resultados, à medida que a espessura do anel de dielétrico L_2 diminui, aumentam B_2 e B_4 . Em ambos os casos, conseguiu-se atender às especificações de -50dB para a perda de retorno, porém, o segundo caso oferece uma maior rigidez mecânica para o dispositivo.



Figura 4.39 – Comparação entre $|S11_{00}|(dB)$ da estrutura inicial de otimização e da estrutura otimizada e o valor especificado para a perda de retorno, $P^{obj} = -50dB$, referentes ao primeiro suporte, ilustrado na Figura 4.37, para (a) o primeiro e (b) segundo caso otimizado.

Suporte do Guia de Onda Coaxial de Entrada da Antena

O conjunto de Figuras 4.40.(a)-(c) mostra o comportamento de $|S11_{00}|(dB)$ para a estrutura ilustrada na Figura 4.37, referente ao segundo suporte, considerando $L_N = I$, 2 ou 3mm, onde, para cada valor de L_N , analisou-se o desempenho da estrutura para vários valores de B_N , sendo $B_3 = 7.3mm$. Observa-se que para $L_N = I$, 2 e 3mm pode existir um valor ótimo para B_N entre 13.2 e 13.3mm, 13.5 e 13.6mm, 14.6 e 14.7mm, respectivamente. Observa-se novamente que, se por um lado o aumento de L_N melhora a rigidez mecânica, por outro ele contribui para o aumento da perda de retorno e para o aprofundamento das cavidades pelo aumento de B_N .



Figura 4.40 – $|S11_{00}|(dB)$ para o segundo suporte, ilustrado na Figura 4.37, para (a) $L_N = 1mm$, (b) $L_N = 2mm$ e (c) $L_N = 3mm$.

Para otimizar o desempenho dessa estrutura de suporte mecânico, foi utilizado o método de otimização descrito na seção 4.2.1, onde serão ajustados os raios dos cilindros condutores externos, B_2 , B_3 e B_4 , e também os comprimentos L_1 e L_3 da estrutura ilustrada na figura 4.37. Como pode-se observar nas Figuras 4.40.(a) e (b), em ambos os casos as perdas de retorno ao longo da banda passante estão abaixo de -50dB. Logo, para o segundo suporte, será otimizado apenas o caso onde $L_N = 3mm$, com desempenho ilustrado na Figura 4.40.(c). As dimensões iniciais serão $L_N = 3mm$ e $B_N = 14.6mm$. A

	Dimensõ	es otimizadas
Seção de guia de onda coaxial	B (mm)	L (mm)
Seção 2	15.00	2.11
Seção 3	7.83	3.00
Seção 4	15.00	2.11

otimização será realizada considerando-se como valor da espessura do anel dielétrico, $L_2 = 3mm$. As dimensões resultantes são listadas na Tabela 4.22.

Tabela 4.22 – Dimensões resultantes da otimização considerando $L_2 = 3mm$, para a segunda estrutura de suporte mecânico.

A Figura 4.41 compara o comportamento de $|S11_{00}|(dB)$ para a estrutura inicial de otimização e para a estrutura otimizada com o valor especificado para a perda de retorno, $P_f^{obj}(x) = -50dB$. Como observado neste conjunto de resultados, conseguiu-se atender as especificações de -50dB para a perda de retorno, mantendo uma boa rigidez mecânica para o dispositivo com $L_2 = 3mm$.



Figura 4.41 – Comparação entre $|S11_{00}|(dB)$ da estrutura inicial de otimização e da estrutura otimizada e o valor especificado para a perda de retorno, $P^{obj} = -50dB$, referentes ao segundo suporte, ilustrado na Figura 4.37, considerando-se $L_2 = 3mm$.

4.5.2. Dimensionamento da Estrutura de Acoplamento Completa

Para uma análise inicial da estrutura de acoplamento completa, serão considerados os suportes resultantes da otimização com $L_2 = 3mm$, pois apresentaram a melhor relação entre rigidez mecânica e perda de retorno, e a estrutura de transição com $L_G = 1.66 mm$, apresentada no item 4.4.2.

A Figura 4.42 mostra os valores de $|S11_{00}|(dB)$ obtidos para três valores das distâncias $D_1 = D_2 = D$, descritas na figura 4.36.



Figura 4.42 – $|S11_{00}|(dB)$ para o acoplador ilustrado na Figura 4.36.

Para otimizar o desempenho do acoplador completo, foi utilizado o método de otimização descrito na seção 4.2.1, onde inicialmente serão ajustados os comprimentos D_1 e D_2 da estrutura ilustrada na Figura 4.36. Será utilizado como valor inicial $D_1 = D_2 = D = 1.9 cm$. Apesar desse dimensionamento para D apresentar perdas de até -38.3dB, como ilustrado na Figura 4.42, espera-se que o ajuste da distância entre as partes permita reduzir esses valores.

A Figura 4.43 compara o comportamento de $|S11_{00}|(dB)$ para a estrutura inicial de otimização e para a estrutura otimizada, onde obteve-se $D_1 = 1.44cm$ e $D_2 = 4.08cm$, com o valor especificado para a perda de retorno, $P_f^{obj}(x) = -50dB$.



Figura 4.43 – Comparação entre $|S11_{00}|(dB)$ da estrutura inicial de otimização e da estrutura otimizada e o valor especificado para a perda de retorno, $P^{obj} = -50dB$, referentes à Figura 4.36.

Observa-se que os valores obtidos para a perda de retorno da estrutura otimizada estão acima da perda de retorno pré-estabelecida como objetivo devido ao fato de que foram ajustadas somente as distâncias entre as partes que compõem a estrutura de acoplamento completa.

Pode-se chegar a uma configuração das dimensões desse acoplador que melhore o desempenho da perda de retorno através de uma segunda otimização, onde serão ajustadas todas as dimensões que constituem esse dispositivo, adotando como estrutura inicial de otimização a estrutura otimizada anteriormente com $D_1 = 1.44cm$ e $D_2 = 4.08cm$.

Para essa configuração, foram ajustados todos os comprimentos das seções de guias de onda coaxiais e também os raios dos cilindros condutores externos da segunda, terceira, quarta, oitava, nona e décima seções de guias de onda coaxiais lisos, B_2 , B_3 , B_4 , B_8 , B_9 e B_{10} , respectivamente, da estrutura ilustrada na Figura 4.36. As dimensões resultantes desse segundo caso estão listadas na Tabela 4.23.

A Figura 4.44 compara o comportamento de $|S11_{00}|(dB)$ para a estrutura inicial de otimização e para a estrutura otimizada com o valor especificado para a perda de retorno, $P_f^{obj}(x) = -50 dB$.

Seção de guia de onda coaxial	B (mm)	L (mm)
Seção 2	6.76	2.82
Seção 3	3.75	3.00
Seção 4	6.30	3.47
Seção 5	3.70	14.79
Seção 6	7.30	1.62
Seção 7	7.30	57.71
Seção 8	15.00	2.30
Seção 9	7.65	3.00
Seção 10	15.00	2.21

Tabela 4.23 – dimensões resultantes do segundo caso de otimização da estrutura de acoplamento completa referente à Figura 4.36.



Figura 4.44 – Comparação entre $|S11_{00}|(dB)$ da estrutura inicial de otimização e da estrutura resultante do segundo caso otimizado e o valor especificado para a perda de retorno, $P^{obj} = -50dB$, referentes à Figura 4.36.