

6 Conclusões

6.1. Introdução

O estudo desenvolvido neste trabalho teve por objetivo analisar a estrutura de guia cilíndrico corrugado e corneta cônica corrugada com dielétrico anisotrópico, com eixo óptico na direção axial. A anisotropia uniaxial do bastão dielétrico pode ser conseguida utilizando-se um material dielétrico de alta permissividade dielétrica relativa, homogêneo e isotrópico e perfurando este dielétrico com vários furos na direção axial. As perfurações reduzem a permissividade relativa, possibilitando o uso de um material leve, mantendo a homogeneidade e relativa estabilidade mecânica, criando uma anisotropia na direção das perfurações [8]. Esta técnica foi descrita neste trabalho e é apresentada como uma opção para o tratamento dielétrico e possível ferramenta para redução de perda de retorno da estrutura.

Inicialmente, foi estudado um guia cilíndrico corrugado com bastão dielétrico anisotrópico uniaxial junto com alguns casos já conhecidos na literatura, como guia cilíndrico corrugado oco [5], guia cilíndrico com bastão dielétrico [4], guia cilíndrico corrugado com bastão dielétrico isotrópico [6,7].

Para cada uma das estruturas citadas, foram desenvolvidas suas expressões de campo na abertura do guia, suas expressões de curvas características e levantadas suas curvas de dispersão. Com o valor da constante de propagação obtida através da curva de dispersão, foram obtidos os valores de campo na abertura e conseqüente campo radiado distante. Foram levantados, então, os diagramas de polarização direta e cruzada considerando-se a terceira definição de Ludwig [11]. Ao longo do desenvolvimento teórico, foram realizadas comparações entre os casos existentes na literatura (para os casos limites de isotropia e corrugação nula), validando as expressões obtidas.

Para o desenvolvimento das expressões dos campos no interior do guia cilíndrico corrugado com bastão dielétrico anisotrópico foram consideradas algumas aproximações. Como primeira aproximação, considerou-se o dielétrico sem perdas. Como segunda aproximação, foi considerada também a abordagem

teórica de impedância de superfície no lugar da técnica de harmônicos espaciais, pois esta é uma boa aproximação quando a largura de corrugação é menor do que um décimo do comprimento de onda [10], melhorando quando o número de corrugações aumenta por comprimento de onda. Para a obtenção das anisotropias, foi sugerido como opção a utilização de uma técnica onde, dielétricos isotrópicos são perfurados com uma determinada quantidade de furos homogeneamente distribuídos, de maneira a obter uma permissividade equivalente à de um dielétrico anisotrópico de permissividade bem menor, conseguindo com isto uma estabilidade mecânica do dielétrico maior que a espuma dielétrica.

Ainda no desenvolvimento das expressões dos campos no interior do guia cilíndrico corrugado com bastão dielétrico anisotrópico, a partir da componente axial (z) do campo, dada por uma expansão de modos dentro e fora do dielétrico, são obtidas as expressões das componentes axiais dos campos elétrico e magnético que satisfaçam as equações diferenciais de Maxwell para coordenadas cilíndricas, utilizando a equação de onda e os potenciais vetores de Hertz (elétrico e magnético). A partir dessas expressões, foram obtidas as expressões para todas as componentes do campo no interior do guia.

Em seguida, foram aplicadas as condições de contorno às equações de campo para o problema em questão, obtendo-se como resultado um sistema de equações complexo que pode ser colocado na forma matricial e resolvido impondo-se que a solução deste sistema de equações não tenha apenas a sua solução trivial (seu determinante seja nulo). Considerando que o dielétrico tem poucas perdas (tangente de perdas praticamente nulo), pode-se admitir que só existe a constante de fase (β) na propagação. O sistema de equações a ser resolvido é um sistema homogêneo, resultando em soluções não singulares para cada valor da constante de propagação. Este sistema de equações foi resolvido analiticamente, apresentando funções de Bessel de primeiro e segundo tipo com argumentos reais e imaginários, junto com suas derivadas.

Foram obtidas várias curvas de dispersão (solução), uma para cada modo de propagação dos campos. Estas curvas forneceram os valores da constante de propagação em função da frequência para os modos existentes no guia. Para a estrutura investigada do guia corrugado com dielétrico anisotrópico, as curvas de dispersão são obtidas inicialmente, zerando a constante de propagação e encontrando a frequência de corte a ser usada como valor inicial para cada modo existente. Estes modos são conhecidos por modos híbridos, pois possuem

componentes transversais elétrico e magnético, sendo especificados neste trabalho como HE e EH respectivamente.

Nas expressões dos campos eletromagnéticos no interior do guia são utilizados os coeficientes A_n , B_n , C_n , D_n , E_n e F_n . O processo para determinação destes coeficientes é feito tendo em mãos o valor da constante de propagação obtido através das curvas de dispersão e resolvendo o sistema formulado para a obtenção das curvas características. A solução deste sistema envolve uma formulação matemática bastante extensa e complexa, sendo também extensas e complexas as expressões obtidas destes coeficientes.

A partir destes coeficientes obtém-se completamente os campos no interior da estrutura. Os campos radiados distantes são então conseguidos através da aplicação da Transformada de Fourier dos campos tangenciais na abertura do guia.

Com os campos radiados distantes encontrados, foram obtidos os campos com polarização direta e cruzada (co e *crosspolar*) usando a terceira definição de Ludwig [11]. Em seguida, foram levantados os respectivos diagramas de radiação.

Alguns casos particulares foram simulados para validar e analisar o efeito da anisotropia no núcleo dielétrico. Foi usada uma geometria de guia cilíndrico corrugado com bastão dielétrico posicionado no centro do guia, na direção axial, considerando como parâmetros: raio do dielétrico $r_1 = 50,54$ mm ($r_1 = 0,8 r_0$), raio interno do guia corrugado $r_0 = 63,17$ mm e profundidade de corrugação $d = 8$ mm e $d = 14$ mm. Inicialmente foi considerado um núcleo dielétrico isotrópico com $\epsilon_r = 1,05$ para comparar os resultados com os existentes na literatura (espera-se que o resultado seja muito próximo do caso do guia corrugado oco).

Em seguida, considerou-se um dielétrico isotrópico com $\epsilon_r = 3,745$ e levantou-se as curvas de dispersão para os 2 primeiros modos. Então, usando um dielétrico isotrópico com $\epsilon_r = 10,3$, com perfurações simulando a anisotropia o qual, após as perfurações, apresentou $\epsilon_z = 3,745$ e $\epsilon_t = 2,737$, foram obtidos valores para as curvas de dispersão para os primeiros modos desta estrutura (guia cilíndrico corrugado com dielétrico anisotrópico). Estes valores foram comparados com os valores dos casos de guia corrugado com dielétrico isotrópico e guia corrugado oco. Verificou-se que as curvas para o guia corrugado com dielétrico anisotrópico ficaram praticamente idênticas às curvas para o guia corrugado com dielétrico isotrópico, ocorrendo um aumento na frequência de corte do modo HE11 para o caso anisotrópico.

Os padrões de radiação para os dois casos analisados foram apresentados na Figura 3.3, onde foi verificado que a presença da anisotropia trouxe um incremento de aproximadamente 3 dB na polarização cruzada. O campo radiado com polarização direta apresentou valor de lóbulo secundário menor para o caso anisotrópico.

Variou-se então, a profundidade de corrugação para verificar a obtenção de curvas de dispersão mais precisas nas frequências mais altas (com menos ruído) do que as obtidas com $d = 8$ mm. Os casos estudados utilizaram uma profundidade de corrugação igual a 14 mm [6], para as mesmas configurações descritas anteriormente (raio interno do guia corrugado $r_0 = 63,17$ mm, raio externo do guia $r_2 = r_0 + d = 77,17$ mm e raio do dielétrico $r_1 = 50,54$ mm).

Pode-se verificar pelas Figuras 4.1 a 4.11 que o campo apresenta distorções na região entre r_1 e r_0 (mais próximo a r_1) para as frequências mais baixas, onde o número de onda normalizado com relação a k_0 (β/k_0) ainda é menor do que 1. Quando β/k_0 é maior do que 1 e menor do que a raiz de ϵ_z , observou-se que a distribuição está entre a distribuição constante e a do modo TE₁₁. Quando a frequência aumenta e o número de onda normalizado (β/k_0) é maior do que a raiz de ϵ_z , o campo volta a piorar, apresentando distorções dentro e fora do dielétrico.

O comportamento obtido para o guia corrugado com dielétrico anisotrópico para a estrutura descrita no Capítulo 2, esteve entre os casos de guia corrugado e de guia dielétrico, conforme pode ser visualizado nas Figuras 5.21 e 5.22. A anisotropia alterou a forma para a condição híbrida balanceada. Para o caso onde $\epsilon_z = 1,5$ e $\epsilon_t = 1,3$, a condição híbrida balanceada foi alcançada na frequência de 6 GHz. No caso, $\epsilon_t = 1,5$ e $\epsilon_z = 1,9$, esta condição também foi atingida na frequência de 6 GHz.

Foi desenvolvido um estudo paramétrico objetivando analisar o efeito da anisotropia do bastão dielétrico. Buscou-se uma grande variação de ϵ_t com relação a ϵ_z . Daí a escolha de $\epsilon_z = 1,5$, que possibilita valores factíveis (valor entre espuma dielétrica e PTFE). A condição de balanceamento híbrido ($E_y = 0$) é de difícil solução analítica dada a grande complexidade das expressões associadas, entretanto esta condição é alcançável, como mostram as Figuras 5.19 e 5.20. Nestes casos especiais foram conseguidos resultados excelentes de polarização cruzada com relação à frequência, como mostrado nas Figuras 5.21 e 5.22 para os casos de anisotropia com $\epsilon_z = 1.5$ e $\epsilon_t = 1.3$ e, $\epsilon_z = 1.9$ e $\epsilon_t = 1.5$.

Espera-se que com ϵ_z muito alto a reflexão aumente nas transições localizadas no início do dielétrico e na abertura da corneta. A avaliação destas

reflexões e o estudo de uma transição de permissividade para sua redução são pesquisas a serem desenvolvidas.

Após a análise paramétrica realizada para o guia cilíndrico corrugado com núcleo dielétrico anisotrópico, foi realizada uma análise para uma corneta cônica corrugada com núcleo dielétrico anisotrópico, com as mesmas configurações utilizadas para o guia cilíndrico corrugado com dielétrico anisotrópico.

Para a corneta cônica corrugada com bastão dielétrico anisotrópico com ângulo de abertura de 12° (estrutura descrita no Capítulo 3), observou-se que, na polarização principal (*co-polar*), houve o preenchimento parcial dos nulos em todos os casos, onde se manteve ϵ_z constante e variou-se ϵ_t de 1,1 a 1,9, conforme pode ser visto nas Figuras 5.24.a-d. Na Figura 5.25, é apresentada uma comparação entre o guia cilíndrico corrugado com dielétrico anisotrópico e uma corneta cônica corrugada com dielétrico anisotrópico, com as mesmas configurações, onde pode ser visto que o nível da largura de feixe de meia potência (3 dB) aumentou cerca de 0,4 dB para a corneta em relação ao guia em toda a faixa de permissividade estudada. Isto foi devido à capa esférica impressa na distribuição de fase na abertura, que tem o efeito de uma abertura ligeiramente menor comparado com o caso de distribuição de fase constante.

A máxima polarização cruzada para a corneta cônica corrugada com núcleo dielétrico anisotrópico apresentou resultados similares aos do guia cilíndrico corrugado com núcleo dielétrico anisotrópico (Figura 5.26), sendo que para os dois casos foi conseguida a condição híbrida balanceada com $\epsilon_z = 1,5$ e $\epsilon_t = 1,3$ (o mesmo acontece com: $\epsilon_z = 1,9$ e $\epsilon_t = 1,5$) na frequência de 6 GHz.

A complexidade das equações dos campos e da equação para obtenção das curvas características, fez com que fossem necessárias análises mais aprofundadas das curvas de dispersão e o desenvolvimento de técnicas numéricas mais elaboradas para o levantamento destas curvas. Dentre estas técnicas está o levantamento de pontos independentes (sem o acompanhamento tendo como ponto de partida o ponto anterior da curva de um modo determinado) que são soluções da equação característica e posterior determinação de qual modo os pontos pertencem. Isto evita o erro devido a pólos e raízes especiais (pontos de acoplamento de modos).

Para frequências elevadas, foi observado o surgimento de ruídos numéricos no cálculo das curvas de dispersão, devido aos cálculos das funções de Bessel de argumento imaginário, cujos argumentos se tornam grandes e de difícil tratamento. Uma possível solução seria o tratamento da equação

característica com expressões assintóticas para as funções de Bessel com argumentos complexos.

6.2. Trabalhos Futuros

Das análises realizadas, verificou-se que alguns outros estudos poderiam ser realizados, entre eles:

- a) Análise da estrutura do guia cilíndrico transformado em uma corneta no formato cilíndrico cônico com a mesma estrutura complexa, utilizando-se uma outra técnica, o casamento modal.
- b) Análise dos resultados obtidos neste trabalho utilizando uma ferramenta de software existente no mercado.
- c) Implementação de transição de permissividade para diminuir a reflexão na garganta e na abertura da corneta.
- d) Implementação de métodos assintóticos para o cálculo das funções de Bessel reais e imaginárias com grandes argumentos, para a eliminação de ruídos numéricos quando da obtenção das curvas características em altas frequências.

6.3. Dificuldades Encontradas

O projeto em si é bastante complexo, sendo que alguns aspectos são considerados mais complexos, portanto, mais demorados para serem solucionados. Entre eles, pode-se citar a complexidade da solução da equação característica, que envolve um tratamento matemático bastante elaborado; a existência de pólos falsos na equação característica, o que também dificulta sua resolução. Outra dificuldade observada no levantamento das curvas de dispersão foi quando as curvas de solução para o levantamento dos pontos se aproximavam de zero, mas não cruzavam o eixo ou cruzavam o eixo, mas ficavam muito próximas de zero, não sendo detectadas as raízes. Para a estrutura estudada, o software tinha que ser reajustado a cada novo modo (e/ou intervalo), pois dependendo da precisão, pode-se pular um modo, ou 'pegar' o modo errado.

Outra dificuldade encontrada é que as Funções de Bessel do segundo tipo envolvendo argumentos imaginários podem gerar erros de precisão quando o argumento imaginário se torna grande. Para este caso foi necessário um estudo para identificar rotinas que sobrepujam este problema numérico.

Devido à complexidade associada, a obtenção dos coeficientes A_n , B_n , C_n , D_n , E_n , e F_n , resultaram em expressões muito extensas, sendo considerada também uma dificuldade.

6.4. Contribuição da Pesquisa

Acredita-se que este trabalho pesquise uma estrutura até o momento não investigada. Logo, o desenvolvimento teórico para esta estrutura propagante é, então considerada uma contribuição científica.

Também neste trabalho, é sugerida uma nova técnica para implementação da anisotropia uniaxial a partir de dielétricos isotrópicos com valores de permissividade mais elevados. Estes dielétricos normalmente possuem estabilidade mecânica que é altamente desejada na construção da estrutura objeto desta pesquisa. Isto dispensaria o uso de espumas dielétricas que, além do custo elevado e fragilidade mecânica, normalmente apresentam problemas de homogeneidade dielétrica [17].

O desenvolvimento de uma técnica computacional para implementação das curvas características, que manobrem as dificuldades inerentes ao formalismo matemático gerado pela estrutura em análise é em si uma contribuição e gera estudos particulares de comportamento de variados parâmetros que acompanham as curvas de dispersão, como influência da anisotropia na frequência de corte e no campo distante.

A análise particular dos efeitos de vários parâmetros com relação às curvas de dispersão dos vários modos associados à estrutura, visando compreender e inferir efeitos eletromagnéticos.

Contribui-se também com uma análise paramétrica desta estrutura. Nesta análise, parâmetros como a anisotropia do dielétrico são utilizados para verificação das características como polarização cruzada, largura de feixe e lóbulos laterais. Um resultado interessante sobre a anisotropia foi que esta apresentou em determinadas situações o balanceamento híbrido, como no resultado em comparação com o caso corrugado e dielétrico apresentados nas Figuras 5.17 e 5.19.

6.5. Trabalhos Científicos Gerados

A partir dos estudos realizados nesta Tese, foram gerados alguns trabalhos científicos, os quais são citados a seguir:

K. C. C. O. Senhorini, J. R. Descardecı and J. R. Bergmann. “Anisotropic-dielectric-loaded corrugated guide”, Sep 2010, MOMAG2010, Vitória, ES.

K. C. C. O. Senhorini, J. R. Bergmann and J. R. Descardecı. “New anisotropic cylindrical waveguide structure”. 9th International Symposium on Antennas, Propagation, and EM Theory, ISAP2010, Nov 29 - Dec 2, 2010, Guangzhou, China.

K. C. C. O. Senhorini, J. R. Bergmann and J. R. Descardecı. “Analysis of a complex waveguide structure for microwave wideband low cross-polar aperture antenna”, 5th European Conference on Antennas and Propagation EuCAP 2011, 11 – 15 April 2011 in Rome, Italy.

K. C. C. O. Senhorini, J. R. Descardecı and J. R. Bergmann. “Anisotropic-dielectric-loaded corrugated guide”. Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications, 2011, vol. 10, No. 1, pp 278-287.