

1 Introdução

1.1. Contextualização do Problema

A crescente demanda por tecnologias de acesso de alta velocidade para a transmissão de dados a altas taxas ou de “streaming” de voz e vídeos tem impulsionado o mercado de acesso em banda larga para a “última milha”, direcionada a clientes residências, pequenas e médias empresas. Este acesso de “última milha” pode ser feito através da utilização de tecnologias com ou sem fio. Dentre as que utilizam fio, destaca-se a fibra ótica pelo alto desempenho e confiabilidade. Entretanto, esforços vêm sendo empregados na pesquisa e no desenvolvimento de tecnologias de acesso sem fio para atender a esta demanda de mercado e para reduzir os custos e a velocidade de implantação. Como exemplo destas tecnologias sem fio pode-se citar o LMDS (Local Multipoint Distribution System) [1-5]. A tecnologia LMDS vem sendo desenvolvida desde 1986, sendo, inicialmente, aplicada em serviços de TV por assinatura, a partir de transmissão analógica de sinais de televisão e disponibilizada na faixa de frequência de 27,5 a 28,35 GHz nos Estados Unidos e de 40,5 a 42,5 GHz na Europa, dedicados apenas para “downstream”. Atualmente, com o desenvolvimento das tecnologias de transmissão digital, o LMDS tornou-se uma excelente alternativa para acesso de “última milha” de serviços da banda larga e novas faixas de frequência foram disponibilizadas nas proximidades da banda de 25 a 31 GHz, onde cada país segue sua própria regulamentação, dividindo o espectro conforme a conveniência de cada local. No Brasil as bandas alocadas para o LMDS estão entre 25,35 a 28,35 GHz, 29,1 a 29,25 GHz e 31 a 31,3 GHz. Entretanto, outras faixas de frequências foram utilizadas para aplicações similares ao LMDS, como, por exemplo, 3,45 a 3,55 GHz e 10,182 a 10,64 GHz.

A capacidade do sistema, a qualidade do serviço e a área de cobertura dependem, basicamente, do tipo de multiplexação, FDD (Frequency Division Duplexing) ou TDD (Time Division Duplexing), e da modulação digital, QPSK (Quadrature Phase-Shift Keying) ou QAM (Quadrature Amplitude Modulation), usualmente utilizadas [4]. Com o desenvolvimento tecnológico, interfaces com

velocidades cada vez maiores poderão ser disponibilizadas, possibilitando o fornecimento de serviços de interligação de redes corporativas (VPN), de acesso à internet em banda larga (incluindo aplicações VoIP, Vídeo Conferência e Video On Demand), e outros serviços de banda larga.

A arquitetura do LMDS é semelhante ao SMC (Serviço Móvel Celular), sendo baseada na transmissão ponto-multiponto, onde é utilizada uma estação rádio base (ERB) para gerar a cobertura de sinal sobre uma célula para se comunicar simultaneamente com vários usuários (ER – Estações Remotas). Entretanto, ao contrário do SMC, no LMDS os usuários são fixos. Além do tipo de modulação e multiplexação, outro fator determinante no dimensionamento do raio de cobertura da célula é a fragilidade de transmissão na faixa de frequências de ondas milimétricas, susceptíveis as intempéries do canal, restringindo este raio de cobertura para alguns quilômetros. Esta cobertura da área da célula pela ERB pode ser feita através da utilização de uma única antena omnidirecional ou de várias antenas setoriais, onde suas áreas de cobertura somadas devem cobrir toda a área da célula. A principal vantagem da setorização é a possibilidade do reuso da banda de frequência para cada um dos setores, aumentando, assim, o número de canais disponíveis na célula. Já a cobertura omnidirecional tem como principal vantagem a redução de custos pela utilização de apenas uma antena. Para a cobertura omnidirecional podem ser utilizadas antenas com um ou mais refletores, que são atraentes pela possibilidade de obter banda larga e alta eficiência, e, ainda, estruturas compactas quando operando nas faixas de ondas milimétricas.

A polarização vertical do diagrama de radiação destas antenas refletoras pode ser obtida através da utilização de uma corneta cônica excitada pelo modo TM_{01} , ou de uma corneta coaxial cônica excitada pelo modo fundamental TEM. Estes modelos de alimentador produzem um diagrama de radiação com simetria circular e um nulo junto ao eixo de simetria da antena, que, no caso de uma configuração duplo-refletora, proporciona uma melhor iluminação do subrefletor, minimizando a radiação que retorna para a abertura destas cornetas. A polarização horizontal do diagrama de radiação da antena refletora pode ser obtida através da utilização da corneta cônica excitada pelo modo TE_{01} .

A Referência [6] apresenta um exemplo de antena refletora omnidirecional composta por um único refletor obtido a partir da rotação de uma geratriz parabólica sobre um eixo de simetria. Este refletor é alimentado por uma corneta cônica com eixo de simetria coincidente com o do refletor. O foco da parábola está situado sobre o eixo de simetria e coincide com o centro de fase da corneta

cônica. A direção de máximo do diagrama ao longo do plano vertical dependerá do eixo da parábola e a polarização vertical ou horizontal dos campos radiados pela antena dependerá da excitação dos modos TM_{01} ou TE_{01} na corneta, respectivamente. Ainda para esta configuração com um único refletor, as referências [7-9] apresentam o modelamento do refletor para gerar um diagrama co-secante ao quadrado no plano vertical, onde em [7, 8] foi utilizado como alimentador uma corneta coaxial cônica excitada pelo modo fundamental TEM e em [9] uma corneta cônica excitada pelo modo TM_{01} . Este tipo de configuração resulta em uma estrutura pouco compacta com abertura muito menor do que o diâmetro do refletor.

A busca por configurações mais compactas levou a utilização de antenas omnidirecionais de duplos refletores. As Referências [10-17] exploram uma configuração composta por um subrefletor parabólico com foco situado sobre a origem dos eixos cartesianos e um refletor principal responsável pela distribuição da energia no plano vertical. Em [10] foi utilizado como alimentador uma corneta cônica excitada pelo modo TM_{01} , e o refletor principal foi obtido de uma geratriz modelada para aumentar a largura do lobo principal do diagrama de radiação no plano de elevação. Foram apresentados, também, resultados experimentais para o diagrama de radiação desta corneta cônica. Em [11, 12] foi abordada a utilização de subrefletor parabólico combinado com refletor principal cônico (*PACO* – parábola mais cone), onde o ângulo do cone define a direção do lobo principal, conforme ilustrado na Figura 1.1. Estas referências mostram os resultados experimentais para o diagrama de radiação e para a perda de retorno da antena duplo-refletora (*PACO*) alimentada por uma corneta coaxial (TEM) operando entre as frequências de 10 a 26GHz. Posteriormente, baseado nos estudos feitos em [10], em [13] foram apresentados os resultados obtidos para um protótipo de antena alimentada por uma corneta cônica excitada pelo modo TM_{01} e projetado para operar na frequência de 38GHz. De forma semelhante, em [14] foi utilizada uma corneta cônica e foram apresentados os diagramas de radiação obtidos pela excitação da corneta pelos modos TM_{01} e TE_{01} para gerar polarização vertical e horizontal, onde o refletor principal foi modelado para gerar um diagrama co-secante ao quadrado no plano de elevação. Baseado neste projeto, um protótipo foi construído para operar na banda de 40,5 a 42,5 GHz e os resultados obtidos para as medidas foram mostrados em [15]. Alternativamente ao modelamento do diagrama no plano vertical, em [16] o refletor principal tem a forma de uma pirâmide para que aproximasse um diagrama quadrangular no plano azimutal.

Um estudo comparativo entre as configurações com um e dois refletores foi apresentado em [17], mostrando que, para um mesmo tamanho de abertura, as configurações de duplo-refletores apresentam refletores com diâmetros consideravelmente menores que aquelas com um único refletor. Nesta referência foi apresentado, também, o modelamento de ambos os refletores, de forma a obter o controle dos campos na abertura cilíndrica da antena duplo-refletora e o deslocamento do máximo do diagrama de radiação no plano de elevação, sendo utilizado como alimentador uma corneta coaxial excitada pelo modo fundamental TEM.

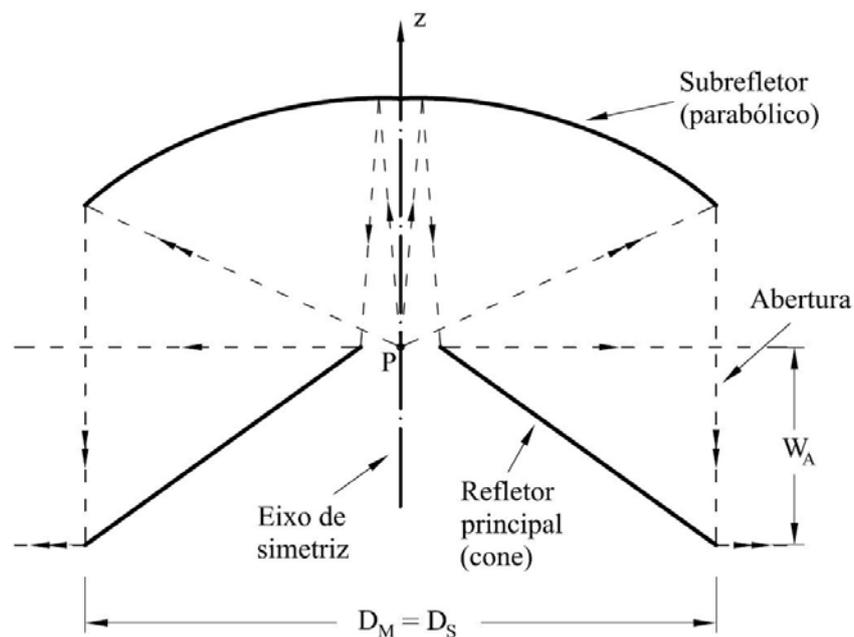


Figura 1.1 – Geometria da antena duplo-refletora para cobertura omnidirecional, composta por um subrefletor parabólico e um refletor principal cônico (PACO).

Apesar da simplicidade do projeto, a utilização de um subrefletor parabólico, apresentado nos estudos feitos em [10-17], faz com que parte da energia refletida pelo subrefletor retorne para a abertura da corneta coaxial, aumentando a perda de retorno da antena duplo-refletora e comprometendo sua operação em banda larga.

Para minimizar a influência do subrefletor na perda de retorno e, simultaneamente, diminuir o diâmetro dos refletores e aumentar a abertura da antena, em [18] é apresentada a OADE (*Omnidirectional Axis-Displaced Ellipse*), ilustrada na Figura 1.2.(a), onde o subrefletor e o refletor principal são obtidos a partir da rotação de curvas geratrizes, elíptica e parabólica, respectivamente, em

torno do eixo de simetria. A alimentação desta antena OADE foi feita através de uma corneta coaxial excitada pelo modo fundamental TEM.

A principal vantagem da OADE em relação a PACO é a presença do anel cáustico real entre os refletores, permitindo o ajuste das geratrizes cônicas, a fim de colocar o foco da parábola P afastado do eixo de simetria. Isto oferece duas vantagens: um alongamento na parábola na direção do eixo de simetria e, conseqüentemente, o aumento da relação entre a abertura da antena e o diâmetro do refletor principal (W_A / D_M), quando comparada com a PACO, ou a mesma relação W_A / D_M da PACO, porém, com um diâmetro D_S menor para o subrefletor. Por último, como se pode ver pelo traçado de raios mostrado na Figura 1.2.(a), o espalhamento eletromagnético do subrefletor que retorna em direção a abertura da corneta coaxial é consideravelmente reduzido, quando comparado com a PACO.

Nesta mesma linha de raciocínio, outras configurações de antenas duplo-refletores omnidirecionais com eixo das geratrizes cônicas deslocado foram apresentadas em [19-29]. Estas antenas são a OADC (*Omnidirectional Axis-Displaced Cassegrain*), a OADG (*Omnidirectional Axis-Displaced Gregorian*) e a OADH (*Omnidirectional Axis-Displaced Hyperbola*), ilustradas nas Figuras 1.2.(b)-(d), respectivamente. Dentre estas quatro configurações destacam-se a OADE e a OADC que possuem geometrias mais compactas, uma vez que a OADG e OADH necessitam de uma distância relativamente grande entre o subrefletor e o alimentador [21]. Em [19, 21] foram apresentados os estudos paramétricos para estas antenas, de forma a identificar estruturas compactas e eficientes. Em [22, 24] foi apresentado o estudo para o deslocamento do máximo do diagrama de radiação no plano de elevação, que foi obtido através do ajuste dos parâmetros das curvas geratrizes dos refletores. Em [20, 23] foi apresentado o modelamento de ambos os refletores das configurações OADE e OADC, de forma que fosse obtida uma distribuição mais uniforme da potência sobre a abertura da antena duplo-refletores e, conseqüentemente, maximizando o ganho destas antenas, chegando a uma eficiência de 94,5% para a configuração OADE. O estudo da utilização de radomes compostos por materiais dielétricos para o suporte mecânico do subrefletor foi abordado em [25, 29]. Em [26-28] foi feito o modelamento do refletor principal destas antenas para obter um diagrama de radiação co-secante ao quadrado no plano de elevação, de forma a proporcionar uma iluminação mais uniforme sobre a área de cobertura da antena.

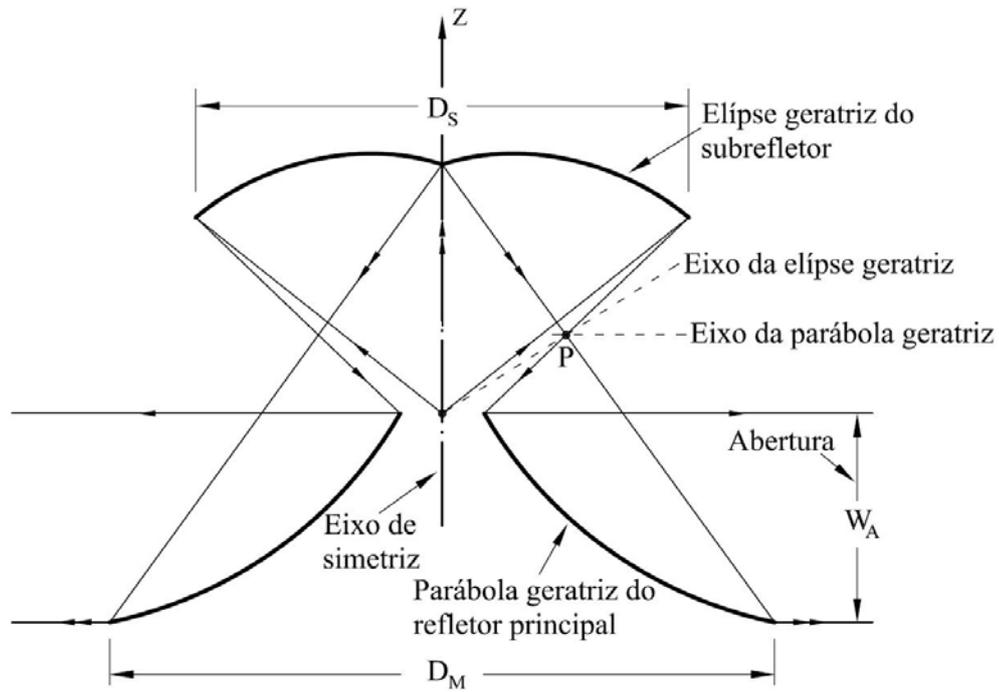
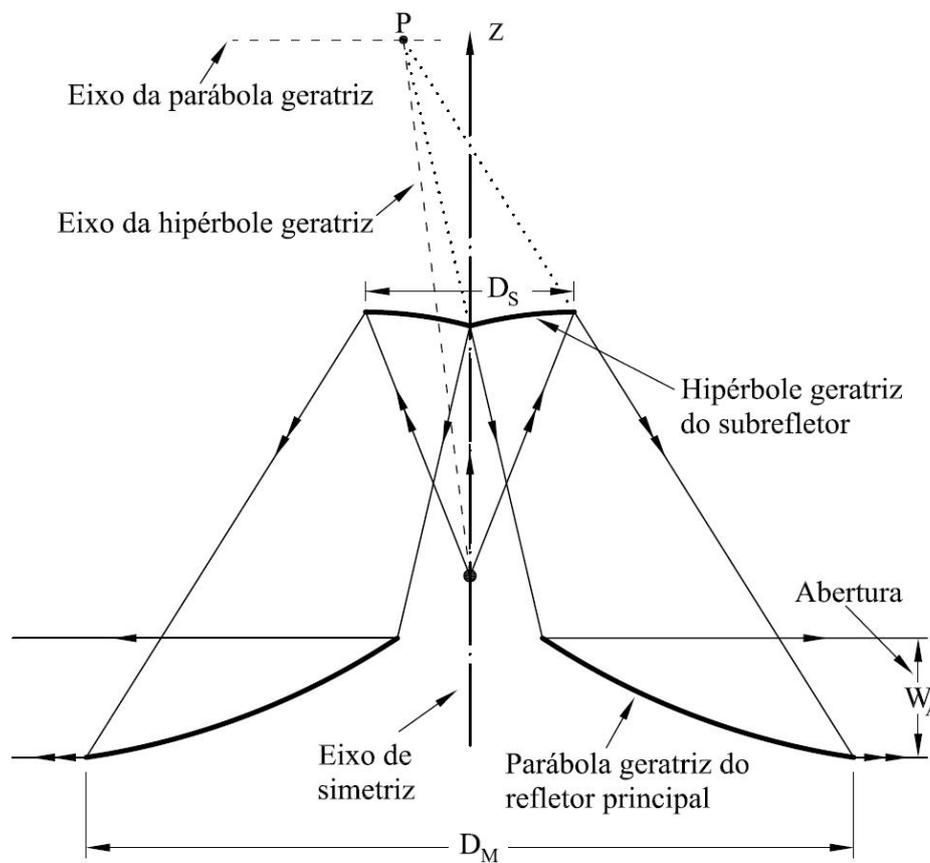
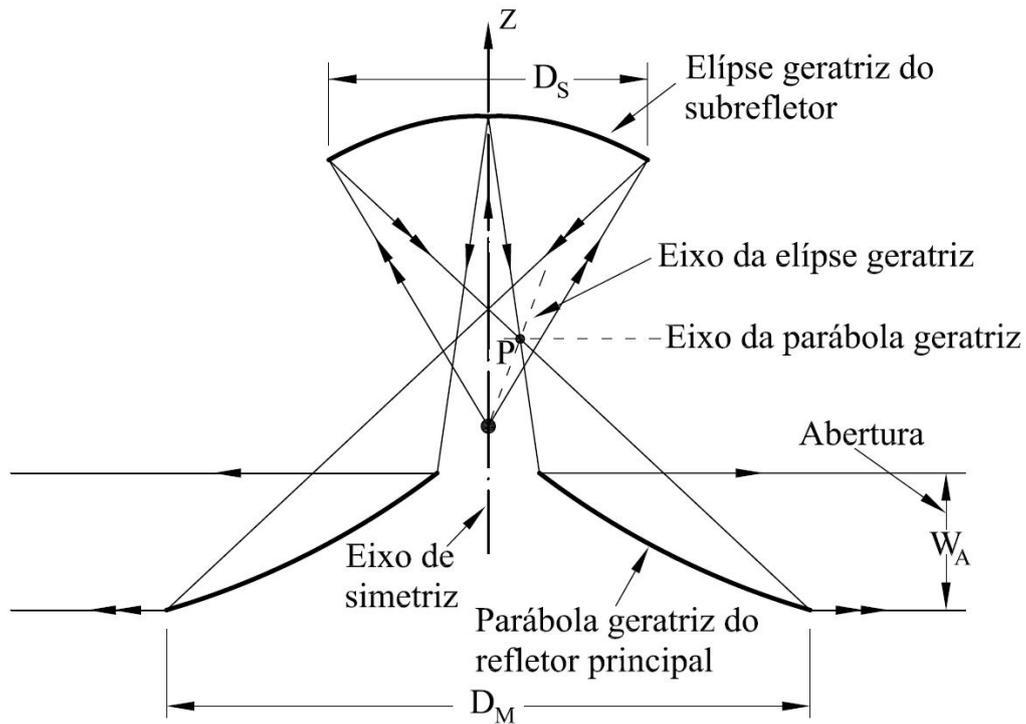
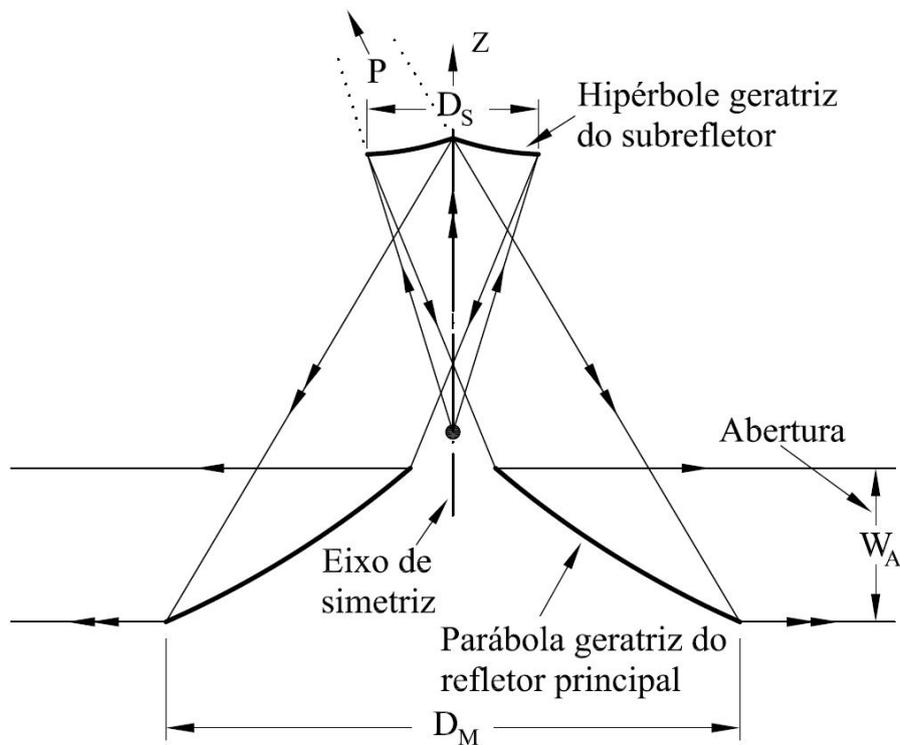
(a) OADE (*Omnidirectional Axis-Displaced Ellipse*)(b) OADC (*Omnidirectional Axis-Displaced Cassegrain*)

Figura 1.2 – Antenas duplo-refletoras omnidirecionais.



(c) OADG (Omnidirectional Axis-Displaced Gregorian)



(d) OADH (Omnidirectional Axis-Displaced Hyperbola)

Figura 1.2 – Antenas duplo-refletoras omnidirecionais (continuação).

Em geral, a síntese destas antenas duplo-refletoras para cobertura omnidirecional é feita através da utilização de técnicas baseadas na Ótica Geométrica (GO), que consistem na obtenção das superfícies refletoras que transformam o campo radiado pelo alimentador em uma distribuição de campo pré-especificado sobre a abertura da antena duplo-refletora, transformando, assim, uma frente de onda esférica em onda cilíndrica sobre a abertura desta antena. Esta técnica envolve a aplicação da lei de reflexão de Snell para os raios óticos, o princípio de conservação de energia em um tubo de raios e o teorema de Malus [30-35].

As técnicas aqui utilizadas para a síntese de antenas omnidirecionais, são baseadas nas técnicas de síntese de antenas de duplos refletores para feixes colimados e apresentadas em [30-35]. Nestas referências, a aplicação da Lei de Snell e do Teorema de Malus resulta em sistema de equações diferenciais lineares de primeira ordem que permite obter a transformação da onda emitida pela fonte em uma nova frente de onda sobre uma abertura plana, em geral com distribuição de fase uniforme para maximização do ganho. A solução numérica do sistema de equações diferenciais depende da determinação do mapeamento entre os raios emitidos pela fonte e os pontos em que eles cruzam a abertura plana após uma dupla reflexão. Para sistemas de duplos refletores *offset*, a solução deste mapeamento é crítica e aproximações foram utilizadas em [32-34]. Entretanto, em [35] é apresentada uma estratégia alternativa, incorporando a condição de conservação de energia na formulação do problema resultando em uma equação diferencial parcial não linear, do tipo Monge-Àmpère. Esta equação é obtida através da utilização de uma função real associada ao refletor principal para a formulação do problema e supõe o sistema iluminado por uma fonte pontual situada sobre a origem. O subrefletor é obtido através da condição de fase constante sobre a abertura da antena duplo-refletora *offset*. Entretanto, para sistemas de duplo refletores axialmente simétricos, a formulação do problema resulta em uma equação diferencial linear de primeira ordem e o mapeamento pode ser estabelecido através do princípio da conservação de energia.

A demanda por alta eficiência e por bandas mais largas eleva o grau de complexidade do projeto destas antenas, sendo necessário o desenvolvimento de ferramentas computacionais mais acuradas que considerem todos os efeitos eletromagnéticos relevantes, de forma a fazer uma predição mais precisa da eficiência, do nível de lóbulos laterais e da perda de retorno, parâmetros importantes na definição da banda de operação da antena.

Os avanços computacionais vividos nos últimos anos proporcionaram o tratamento de problemas eletromagnéticos que não possuem solução analítica, utilizando-se de técnicas numérica. A escolha do método numérico mais apropriado para a análise de cada problema pode aumentar a precisão dos resultados obtidos, reduzir o esforço computacional e o tempo de processamento.

Inicialmente, devido às limitações computacionais, os diversos componentes das antenas eram analisados separadamente, estratégia que limitava a contabilização dos efeitos de acoplamento entre estes dispositivos. Métodos que avaliam o espalhamento eletromagnético como as aproximações da Ótica Geométrica [30-35], da Ótica Física (PO) [36], da Teoria Geométrica da Difração (GTD) [37] e da Teoria Uniforme da Difração [38] são muito empregados no projeto de refletores, em especial, nos de grandes dimensões elétricas produzindo bons resultados na previsão dos efeitos difrativos. Entretanto, estes métodos não incluem os efeitos de acoplamento eletromagnético entre a cadeia de alimentação e o(s) refletor(es) que compõe(m) a antena. No projeto de estruturas compactas, onde os efeitos de acoplamento se tornam mais intensos, isto pode limitar a caracterização do diagrama de radiação e da perda de retorno, essenciais para caracterizar o dispositivo ao longo da banda de operação.

A utilização do Método dos Momentos (MoM) [39] para a solução de equações integrais, juntamente com a aplicação das condições de contorno apropriadas, se mostrou uma ferramenta muito precisa no dimensionamento de estruturas radiantes, prevendo com precisão efeitos de acoplamento eletromagnético entre o alimentador e o(s) refletor(es) da antena. Exemplos da aplicação deste método em estruturas circularmente simétricas são mostrados em [18-29] e [40-45], onde o problema é resolvido em duas dimensões sobre a geratriz que define o corpo de revolução. Apesar de considerar as propriedades de simetria, a aplicação de MoM requer grande esforço computacional ficando limitada sua aplicação exhaustiva a dispositivos com alguns comprimentos de onda. Para minimizar o processamento numérico, as Referências [42-45] apresentam estudos sobre a representação das correntes sobre a estrutura metálica, que permitem reduzir o tempo de processamento e a memória necessários na análise. Porém, a aplicação do Método dos Momentos na análise de estruturas mistas que combinem estruturas dielétricas e condutoras aumenta a complexidade da formulação do problema, o tempo de processamento

numérico e, também, a memória computacional necessários para a solução do problema [46-49].

As primeiras técnicas de projetos de adaptadores e junções que compõe a cadeia de alimentação utilizavam circuitos equivalentes aproximados [50-52]. Embora tenham uma formulação simples, estas técnicas apresentam limitações ao determinar o comportamento eletromagnético de estruturas não convencionais, visto que essas análises são de natureza aproximada e tratam somente de descontinuidades isoladas. Para superar estas limitações nas análises destes componentes da cadeia de alimentação, a literatura apresenta diversos métodos numéricos, onde se destacam o Método dos Elementos Finitos (FEM) [53-56], Método das Diferenças Finitas (FDM) [57] e Método do Casamento de Modos (MMT), [58, 59].

As técnicas de diferenças finitas (FDM) e elementos finitos (FEM) exigem que todo o espaço que envolve a estrutura de análise seja segmentado, demandando muita memória computacional no caso de estruturas eletricamente grandes. Uma vantagem do FDM é a simplicidade da sua formulação, onde, em cada nó da malha, as equações de Maxwell na forma diferencial são transformadas em equações de diferenças finitas algébricas que relacionam o valor da variável dependente em um ponto com os pontos da vizinhança. Isso faz com que a solução seja recursiva de nó em nó, evitando a inversão de grandes matrizes, como no caso do FEM, onde é necessária a solução do sistema linear de equações que envolve a aplicação do método. Entretanto, o FEM permite a análise de estruturas com geometria complexa, visto que os elementos desta grade podem assumir formas variadas, ao contrário do FDM que necessita uma grade retangular, demandando uma grade muito densa no tratamento de estruturas complexas.

Para estruturas com simetria axial e/ou com poucas mudanças nas dimensões das seções de guias de ondas, o Método do Casamento de Modos (MMT) apresenta grande vantagem sobre os demais. Pois não é o tamanho das seções de guias o fator determinante na velocidade de processamento, mas sim o número de descontinuidades e o número de modos utilizados para expressar os campos em cada Seção que determinam o tamanho e o número de matrizes de espalhamento. Isto favorece a utilização do método em processos repetitivos de otimização. Outra vantagem, é que os elementos da matriz de espalhamento associados a cada descontinuidade são obtidos através de expressões analíticas a partir das características do meio e das dimensões das diversas seções de guias de onda que compõem a estrutura, favorecendo a convergência das

aproximações. Quanto às desvantagens, o método se torna complexo no tratamento de estrutura sem simetria, e, também, no caso da análise de estruturas com rampa como, por exemplo, cornetas, há a necessidade da aproximação da estrutura através de pequenos saltos na forma de escada, aumentando o número de descontinuidades e o erro intrínseco devido a essa aproximação.

Outro aspecto importante na escolha do método numérico a ser utilizado é o tratamento integrado de todas as partes que compõem a antena, como, por exemplo, a cadeia de alimentação, a estrutura de suporte e refletores, visando considerar os efeitos de espalhamento e acoplamento entre todas estas partes e aumentando, assim, a precisão dos resultados.

Um método tridimensional que propõe o tratamento integrado entre todas as partes constituintes da antena é o Método das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (FDTD) [60-66]. Este possui grandes vantagens no tratamento de estruturas sem simetria e geometria complexa. Sua formulação é baseada no FDM, fazendo com que, novamente, a solução do problema seja recursiva de nó em nó, evitando a inversão de grandes matrizes, e, também, favorecendo a análise de estruturas não-homogêneas, pois os parâmetros constitutivos do meio podem ser atribuídos a cada nó da grade. Porém, essa solução recursiva requer que toda a região envolvida seja discretizada, o que limita a utilização do método para estruturas eletricamente muito grandes devido ao aumento drástico do tempo de processamento computacional trazido pela necessidade de um refinamento maior da malha, já que o erro é acumulativo. Entretanto, o problema mais comum envolvido com esta técnica é o truncamento do domínio computacional, sendo necessária a utilização de uma condição de fronteira absorvente (ABC) que passa para o domínio computacional a idealização de uma câmara anecóica, onde a precisão do FDTD depende da eficácia da ABC em evitar reflexões nas paredes absorventes. A primeira aplicação da ABC foi feita em [62], porém esse modelo é válido apenas para ondas planas com incidência normal à interface da ABC. Esta idéia serviu de base para o trabalho descrito em [63], que propôs a utilização de camadas perfeitamente casadas (PML) e a decomposição da componente de campo incidente na PML em duas novas componentes ortogonais, resolvendo o problema das ondas com incidência oblíqua. Entretanto, esse procedimento provoca reflexões na interface entre as camadas da PML. Outros trabalhos surgiram na tentativa de reduzir este problema de reflexões e são descritos em [64-66].

Como visto anteriormente, os diferentes métodos numéricos existentes na literatura possuem vantagens e desvantagens quando aplicados na análise e síntese de cada parte constituinte da antena e/ou todas essas partes simultaneamente. Sendo assim, uma estratégia proposta na literatura é fazer a combinação de dois ou mais métodos numéricos, buscando explorar suas vantagens e minimizando as desvantagens, melhorando, assim, o desempenho da ferramenta computacional. A idéia de combinar diferentes métodos numéricos em um método híbrido, já vem sendo utilizada a bastante tempo no tratamento de problema de espalhamento eletromagnético.

Exemplos de métodos híbridos aplicados na análise de antenas podem ser encontrados na literatura [67-82]. Para o tratamento de antenas refletoras com dimensões elétricas extremamente grandes, o estudo da combinação do Método dos Momentos (MoM) com Ótica Física (PO) [67, 68] e Teoria Geométrica da Difração GTD [69] apresentou resultados precisos minimizando o esforço computacional. Porém, estes métodos híbridos apresentam as mesmas limitações quanto ao uso de estruturas dielétricas e tratamento integrado de todas as partes constituintes da antena, descritas acima.

Métodos híbridos mais acurados como a junção entre os diferentes métodos numéricos citados acima (FEM, FDM, MMT e MoM) foram vastamente abordados na literatura [70-82], sendo aplicados no tratamento de diversos problemas como cornetas [70-76], antenas “Slot” [77] e dispositivos de microondas, [78-82], como filtros, guias de onda, etc.

1.2. Objetivos e Organização do Trabalho

Este trabalho tem por objetivo principal apresentar uma técnica de projeto para antenas duplo-refletoras circularmente simétricas para a cobertura omnidirecional, onde o refletor principal é obtido a partir de uma geratriz com formato circular, não sendo ainda explorada na literatura esta configuração de refletor principal para a aplicação omnidirecional. As superfícies refletoras dessas antenas são obtidas a partir da revolução de suas curvas geratrizes em relação ao eixo z , como ilustrado na Figura 1.3.

Na literatura, as técnicas de síntese de antenas duplo-refletoras axialmente simétricas ou offset utilizam os princípios da Ótica Geométrica (GO) [30-35] e, em geral, propõem o controle simultâneo da fase e da potência na abertura

destas antenas. Isto requer o modelamento de ambos os refletores, tendo como preço o aumento nos custos de produção destas antenas, em especial, do refletor principal. Uma alternativa apresentada neste trabalho é a utilização de um refletor principal circularmente simétrico, com geratriz obtida através de um arco de circunferência. A imposição de fase uniforme sobre a abertura da antena pode ser obtida através do modelamento do subrefletor, abdicando da especificação de potência sobre a abertura. Porém, a escolha adequada dos parâmetros geométricos desta antena permite obter um certo grau de controle sobre a distribuição de potência na abertura da antena duplo-refletora e, conseqüentemente, sobre sua eficiência.

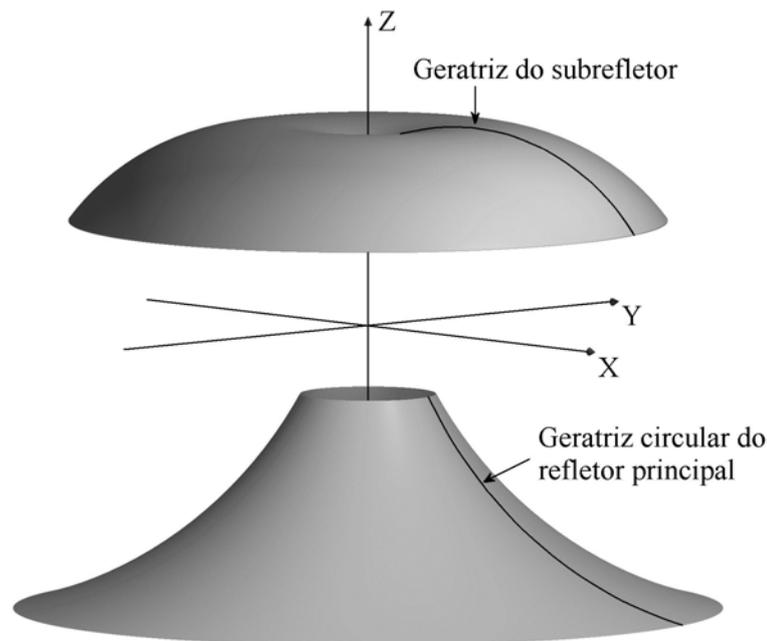


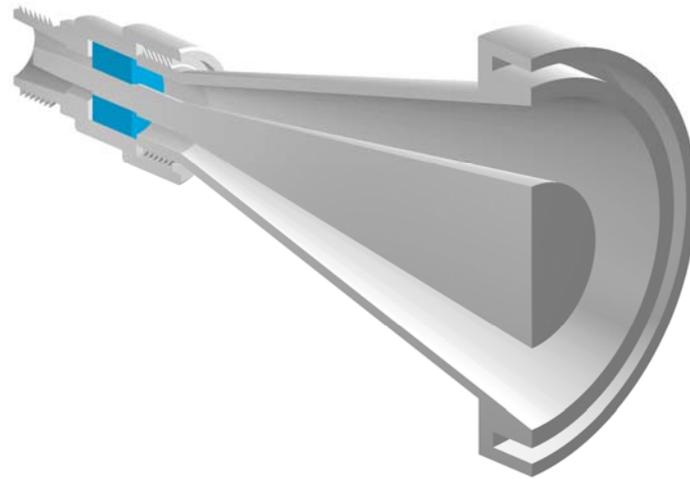
Figura 1.3 – Geometria da antena duplo-refletora circularmente simétrica para cobertura omnidirecional, com refletor principal obtido a partir de uma geratriz circular.

A busca de refletores que maximizem o desempenho eletromagnético destas antenas duplo-refletoras e que forneçam estruturas compactas requer a utilização de ferramentas computacionais eficientes, do ponto de vista numérico. Neste contexto, a combinação de Método da Abertura (ApM) associado às aproximações da Ótica Geométrica (GO) para os campos na abertura [19-24] mostra-se uma excelente estratégia e será utilizada neste trabalho como

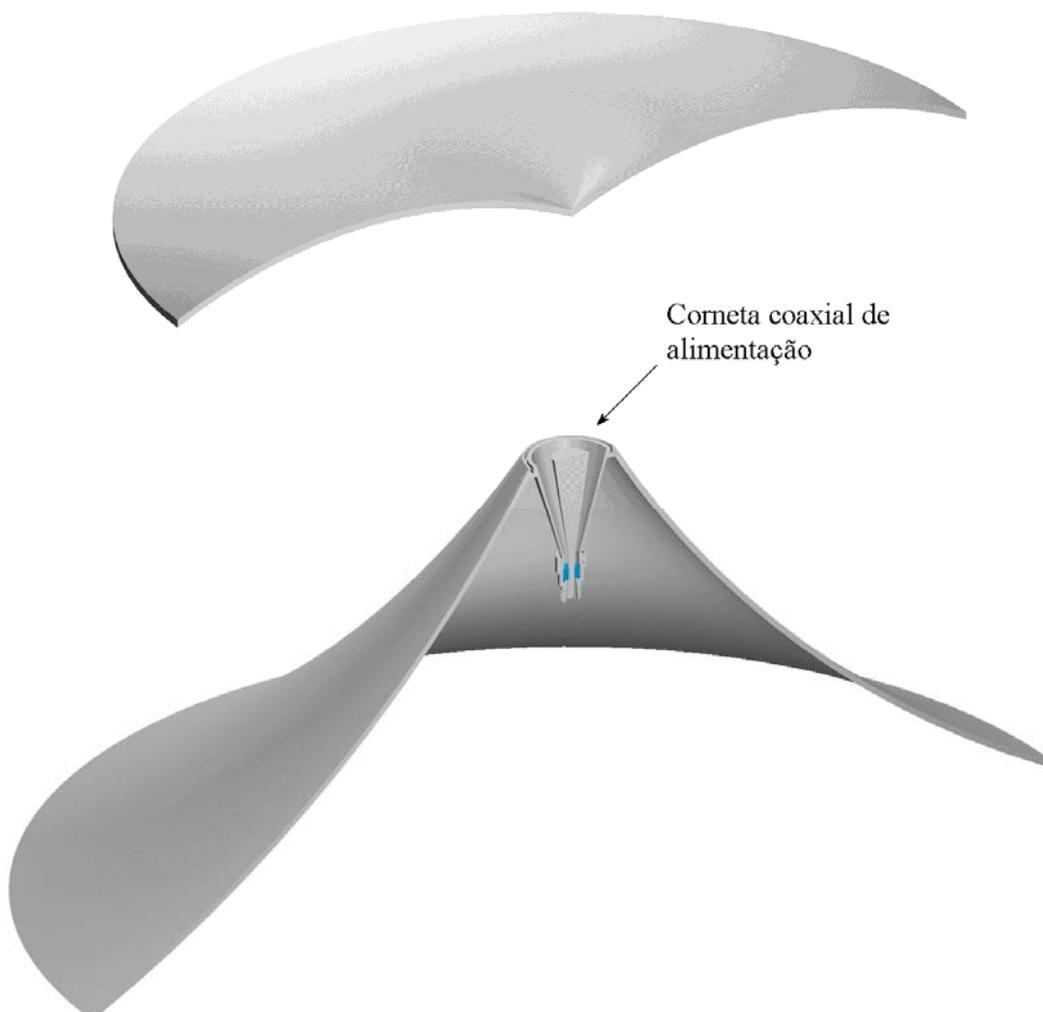
ferramenta de análise na identificação de famílias de estruturas compactas e eficientes. Neste trabalho a formulação descrita em [35] é adotada para o desenvolvimento de um método de síntese do sub-refletor que, associado a um refletor principal com geratriz circular, permite obter uma distribuição de fase constante na abertura cilíndrica da antena, direcionando o máximo do diagrama de radiação ao longo do horizonte.

Uma estratégia para uma melhor iluminação da área de cobertura da antena duplo-refletora omnidirecional é a inclinação do lobo principal do diagrama de radiação em relação ao horizonte [17, 22, 24], evitando interferência nos sistemas adjacentes e, conseqüentemente, aumentando a eficiência espectral. No caso da inclinação do feixe no plano de elevação, os trabalhos apresentados na literatura propõem o ajuste dos parâmetros que definem a geometria de ambos os refletores de forma a obter este deslocamento de feixe, resultando em geometrias distintas para cada ângulo de deslocamento. Entretanto, uma redução no custo de produção deste conjunto de soluções pode ser obtida utilizando o mesmo refletor principal para todas as antenas deste conjunto e modelando o sub-refletor para redirecionar o máximo do diagrama de radiação. Esta estratégia se torna efetiva na medida em que o custo de fabricação do sub-refletor é menor que o do refletor principal. Neste contexto, este trabalho propõe, também, o estudo sobre o desempenho de um conjunto de soluções que utilizam um mesmo refletor principal, obtidos para o máximo do diagrama de radiação ao longo do horizonte, onde o subrefletor é modelado para prover o deslocamento do feixe em relação ao horizonte para cada ângulo. Pelos mesmos motivos citados anteriormente, a análise inicial destas antenas é feita utilizando o Método da Abertura (ApM) associado à Ótica Geométrica (GO).

A alimentação das antenas duplo-refletoras apresentadas neste trabalho será feita através de uma corneta coaxial cônica, excitada pelo modo fundamental TEM [18]. As Figuras 1.4.(a)-(b) ilustram esta corneta coaxial e o seu posicionamento no sistema de duplo-refletores, respectivamente. Para o projeto deste alimentador foi utilizado um conector padrão do tipo "N". Observa-se na Figura 1.4.(a) que a transição entre este conector e o guia de onda coaxial de entrada da corneta coaxial é feita através da utilização de uma estrutura de acoplamento com carregamento dielétrico que, além de fazer esta transição com baixas perdas, tem um papel fundamental na manutenção da rigidez mecânica da estrutura, mantendo centralizado o condutor elétrico central e evitando o aparecimento de modos superiores devido a assimetrias axiais que afetariam o diagrama de radiação e o controle da perda de retorno.



(a) Corneta coaxial TEM.



(b) Corneta coaxial TEM mais refletores.

Figura 1.4 – Corneta coaxial TEM utilizada na alimentação de uma antena duplo-refletores para cobertura omnidirecional.

A inclusão desta estrutura de acoplamento com carregamento dielétrico na cadeia de alimentação, a busca por estruturas compactas e a necessidade de se obter configurações de duplo-refletores que possuam banda larga e alta eficiência tornam complexa a caracterização destas antenas duplo-refletoras ao longo da sua banda de operação. Dentro deste contexto e do apresentado na Seção 1.1, este trabalho propõe, também, uma análise eletromagnética rigorosa destas antenas duplo-refletoras, feita através da utilização do método numérico híbrido composto pelo Método do Casamento de Modos (MMT) e pelo Método dos Momentos (MoM), chamado ao longo deste trabalho de MMT/MoM, escolhidos pelas vantagens citadas na Seção 1.1 no tratamento de estruturas com simetria axial. A combinação do MMT com o MoM foi bastante usada na literatura na análise de diversos tipos de cornetas como, por exemplo, as cônicas corrugadas e piramidais [70-75]. Entretanto, ainda não foi explorada no tratamento de estruturas coaxiais, como, por exemplo, a corneta coaxial excitada pelo modo TEM utilizada neste trabalho. A formulação para o método híbrido MMT/MoM apresentada neste trabalho é baseada em [70, 73].

Para a aplicação deste método híbrido a estrutura interna composta pela cadeia de alimentação e corneta será analisada via MMT e o espalhamento eletromagnético pelos refletores será tratado via MoM aplicado na solução das equações integrais de campo elétrico e magnético, EFIE e MFIE, respectivamente, formuladas em termos das correntes induzidas externamente a antena e da amplitude dos modos na abertura da corneta. Um aspecto importante nesta abordagem é o tratamento integrado de todas as partes que constituem a antena (cadeia de alimentação, corneta, subrefletor e refletor principal), considerando os efeitos de espalhamento e acoplamento entre todas essas estruturas, aumentando, assim, sua precisão.

Isto posto, o trabalho desenvolvido é apresentado neste texto da seguinte forma. No Capítulo 2 é apresentada a formulação do Método do Casamento de Modos (MMT), para o tratamento interno da cadeia de alimentação, e feita a validação do algoritmo computacional implementado, referente a este método, através de dois exemplos retirados da literatura. No Capítulo 3 é descrita a formulação para equações integrais do campo elétrico e magnético, EFIE e MFIE, respectivamente, para a análise do espalhamento eletromagnético por corpos de revolução (BOR – Bodies of Revolution). Ainda no Capítulo 3, estas equações integrais de superfície são avaliadas numericamente através do Método dos Momentos. No Capítulo 4 é apresentada a junção do Método do Casamento de Modos com o Método dos Momentos, que fornecerá o

equacionamento necessário para o cálculo da perda de retorno e campos em região de campo distante referentes ao método híbrido MMT/MoM, essenciais para caracterizar o dispositivo ao longo da banda de operação. Para a validação da ferramenta computacional desenvolvida para o MMT/MoM, na seqüência do Capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos (perda de retorno e campos em região de campo distante) na análise de diversos tipos de estruturas axialmente simétricas. Utilizando o Método da Abertura (ApM) associado à Ótica Geométrica, no Capítulo 5 é feito um estudo paramétrico para as antenas duplo-refletores propostas neste trabalho com o objetivo de obter o conjunto de superfícies refletoras de forma que se tenha a maximização da eficiência destas antenas, para o máximo do diagrama de radiação na linha do horizonte, e também a minimização dos seus volumes, obtendo-se, assim, estruturas compactas. A partir dos refletores principais obtidos no estudo paramétrico conduzido no Capítulo 5 e utilizando o Método da Abertura (ApM) associado à Ótica Geométrica, no Capítulo 6 é feito um estudo do modelamento do subrefletor de forma a obter o deslocamento do feixe em relação ao horizonte para cada ângulo, considerando o mesmo refletor principal. Utilizando o método híbrido MMT/MoM apresentado no Capítulo 4 é, inicialmente, apresentado no Capítulo 7 o remodelamento da corneta coaxial apresentada em [18], projetada para operar com uma perda de retorno abaixo de -15 dB ao longo da banda de 8,4 a 10 GHz. Esta corneta coaxial é utilizada como referência devido ao acesso aos dados de medidas e ao conjunto de dimensões. O remodelamento proposto tem como objetivo a redução da perda de retorno ao longo da banda estendida para 8 a 10,5 GHz e a redução do nível de lóbulos secundários do diagrama de radiação desta corneta coaxial, visto que estes lóbulos laterais poderão interferir na direção de máximo do diagrama de radiação da antena duplo-refletores. Posteriormente, considerando a corneta remodelada e utilizando o MMT/MoM, ainda no Capítulo 7 é feita uma análise rigorosa das configurações de antenas duplo-refletores para cobertura omnidirecional sintetizadas nos Capítulos 5 e 6 que apresentaram os melhores resultados para a maximização da eficiência e minimização do volume, procurando otimizar o desempenho destas antenas em termos do diagrama de radiação e da perda de retorno ao longo da banda de operação. Por fim, no Capítulo 8 são apresentadas as conclusões sobre os resultados obtidos e propostos novos temas para a continuidade da pesquisa.

A dependência temporal adotada em todo o trabalho é da forma $e^{j\omega t}$, onde $\omega = 2\pi f$, sendo f a frequência.