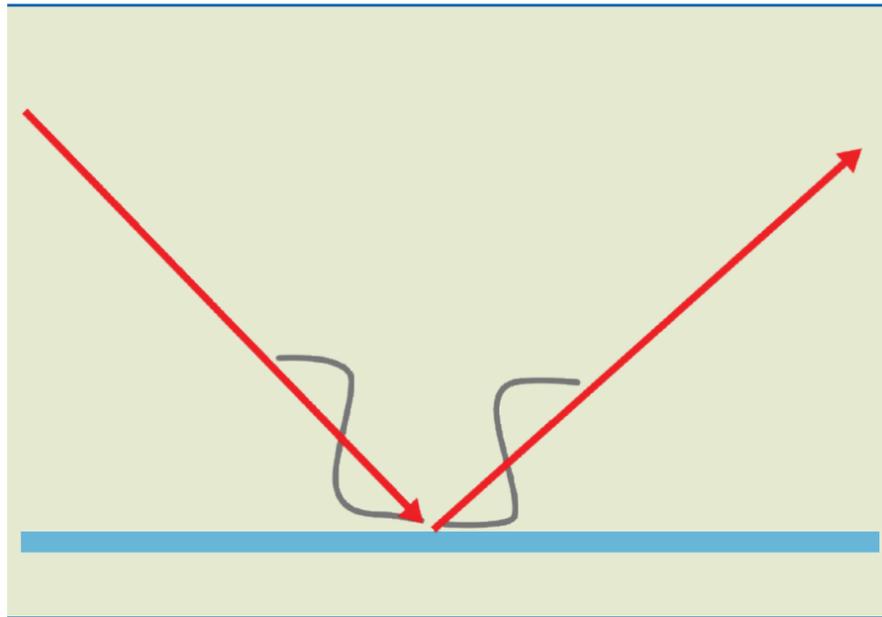


Figura 5.19
Inversão de fase da
onda após a reflexão.



A reflexão do feixe de micro-ondas pode causar problemas na recepção do sinal, gerando, por exemplo, atenuação ou anulação do sinal. Para amenizar os efeitos da reflexão, pode-se aumentar a altura das antenas em relação ao obstáculo ou o bloqueio do feixe refletido em obstáculos naturais do percurso.

5.7 Potência do sinal recebido

O cálculo da potência do sinal recebido devido à onda direta, em função da distância, é dado por:

$$P_r(d) = \frac{P_t \cdot G_t \cdot G_r}{L_{fs} \cdot L} \quad (5.7)$$

em que:

- $P_r(d)$ é a potência recebida, em watts;
- P_t , a potência de emissão, em watts;
- G_t e G_r são os ganhos das antenas de transmissão e recepção;
- L_{fs} é a atenuação no espaço livre;
- L , outras atenuações.

O cálculo da atenuação no espaço livre é dado por:

$$L_{fs} = 92,45 + 20 \cdot \log(F_0 \cdot d) \quad (5.8)$$

em que:

- F_0 é a frequência de operação, em GHz;
- d , a distância, em km.

Capítulo 6

Antenas



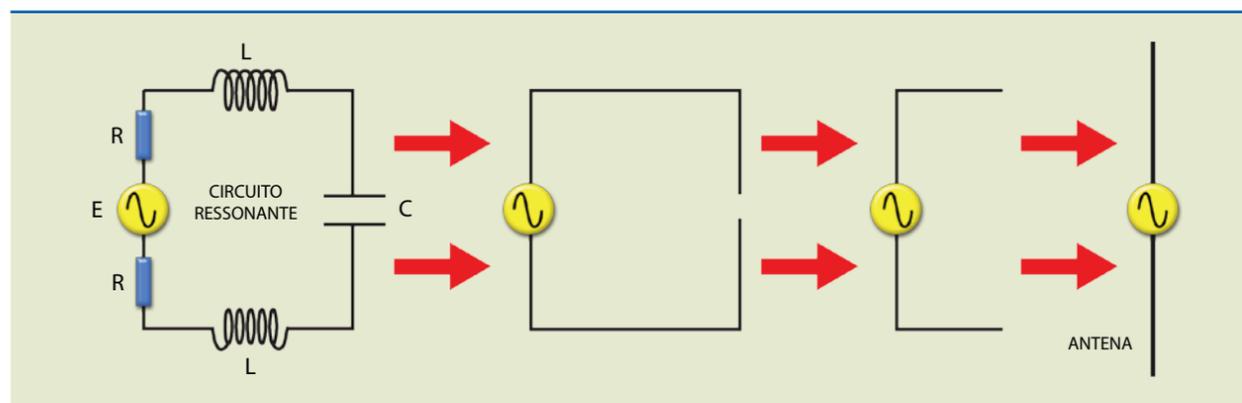
6.1 Definição

A antena é um dispositivo que transforma corrente elétrica de radiofrequência oriunda do transmissor em energia eletromagnética irradiada. Na recepção, a antena realiza o inverso, ou seja, transforma a energia eletromagnética irradiada em corrente de RF para ser entregue ao receptor. Portanto, sua função é primordial em qualquer comunicação em que exista radiofrequência.

Seu dimensionamento é feito em função do comprimento de onda λ , que é definido de acordo com a frequência ou faixa de frequências de operação do sistema rádio.

Uma antena funciona da seguinte maneira: o transmissor produz o sinal da informação na forma de corrente alternada (corrente de radiofrequência). Ao circular na antena de transmissão, a corrente de RF produz uma onda eletromagnética a seu redor, que se irradia pelo ar. Ao atingir uma antena receptora, a onda eletromagnética induz nela uma pequena corrente elétrica, cujas oscilações acompanham o movimento da onda. Essa corrente é muito mais fraca do que a presente na antena transmissora, sendo amplificada no receptor.

Figura 6.1
Circuito ressonante em série.



A faixa de operação da antena ou largura de banda é definida quando ela opera próximo à frequência de ressonância, apresentando comportamento praticamente

resistivo, com anulação das impedâncias capacitiva e indutiva do circuito equivalente ressonante. A figura 6.2 apresenta sua curva de resposta de frequência.

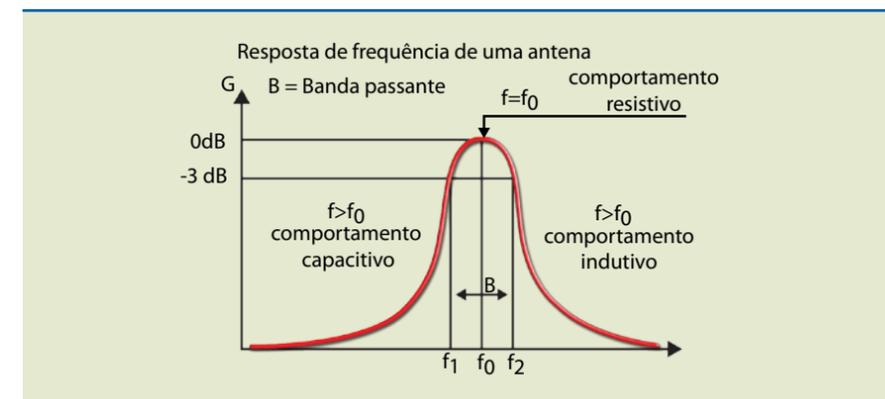


Figura 6.2
Curva de resposta de frequência de uma antena.

Do ponto de vista elétrico, a antena pode ser vista como impedância, com componentes resistivos, capacitivos e indutivos. A impedância da antena na faixa de operação deve ter o mesmo valor apresentado pela linha de transmissão à qual a antena está ligada. Caso contrário, ocorrerá descasamento de impedâncias entre a linha de transmissão e a antena, provocando perdas de energia, devido a reflexões. Essa energia refletida, somada com a energia incidente, gera na linha de transmissão uma onda estacionária, prejudicando a comunicação.

6.2 Diagrama de irradiação

A representação em coordenadas polares da intensidade de campo irradiada ou recebida por uma antena em todas as direções do espaço é chamada de diagrama de irradiação, definido em dois planos: horizontal e vertical (figura 6.3).

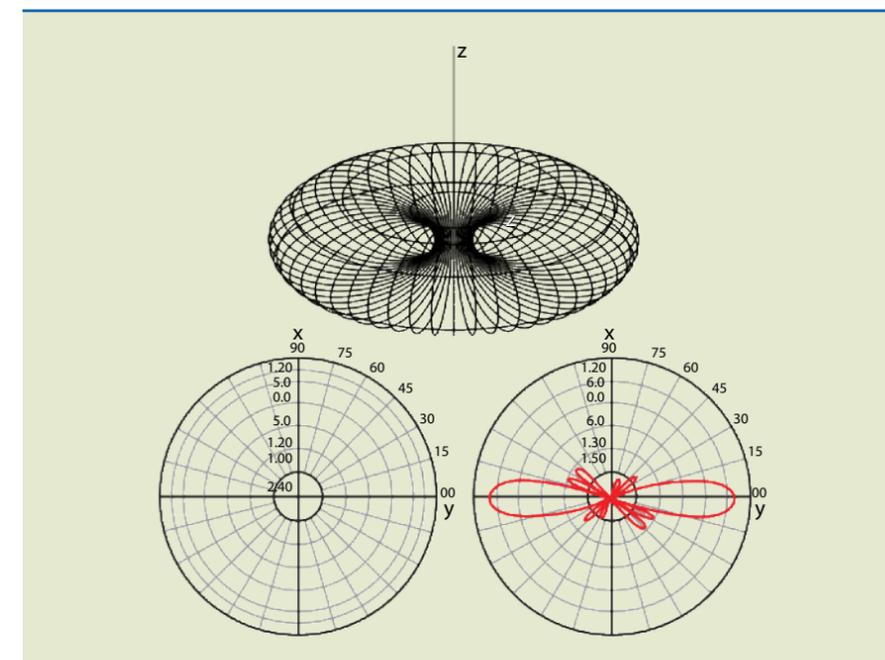


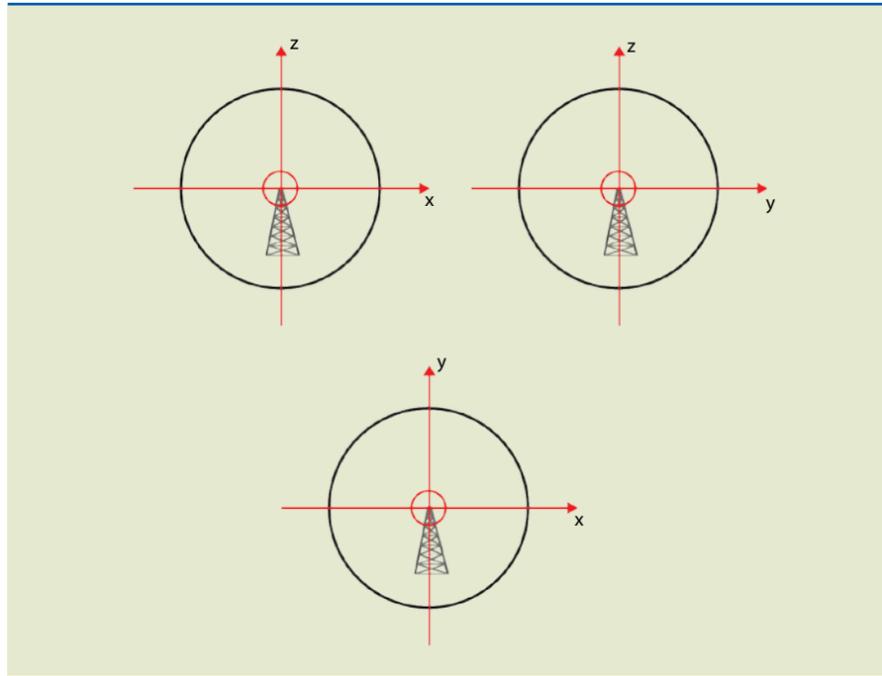
Figura 6.3
Diagramas de irradiação horizontal e vertical de uma antena.



6.3 Antena isotrópica

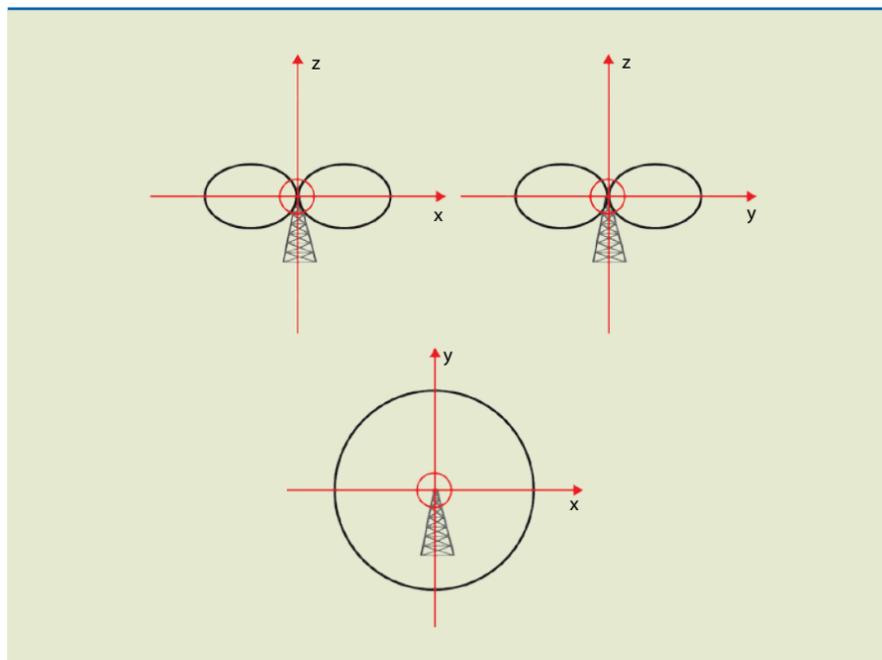
É uma antena ideal, portanto sem perdas, capaz de captar ou irradiar campos eletromagnéticos igualmente em todas as direções. Seu diagrama de irradiação é ilustrado na figura 6.4.

Figura 6.4
Diagrama de irradiação da antena isotrópica.



Na prática, a antena que mais se aproxima da antena isotrópica é a omnidirecional, cujo diagrama de irradiação é mostrado na figura 6.5.

Figura 6.5
Diagrama de irradiação de uma antena omnidirecional real.



6.4 Polarização

Vimos anteriormente que a direção do vetor campo elétrico define a polarização de uma onda:

- Se o vetor está na vertical, a onda está polarizada verticalmente.
- Se o vetor está na horizontal, a onda está polarizada horizontalmente.
- Se o vetor gira no sentido horário, a polarização é circular direita.
- Se o vetor gira no sentido anti-horário, a polarização é circular esquerda.

6.5 Largura de feixe α

É o ângulo formado pelos dois pontos em que o campo máximo reduz seu valor em 0,707, ou seja, -3 dB (figura 6.6).

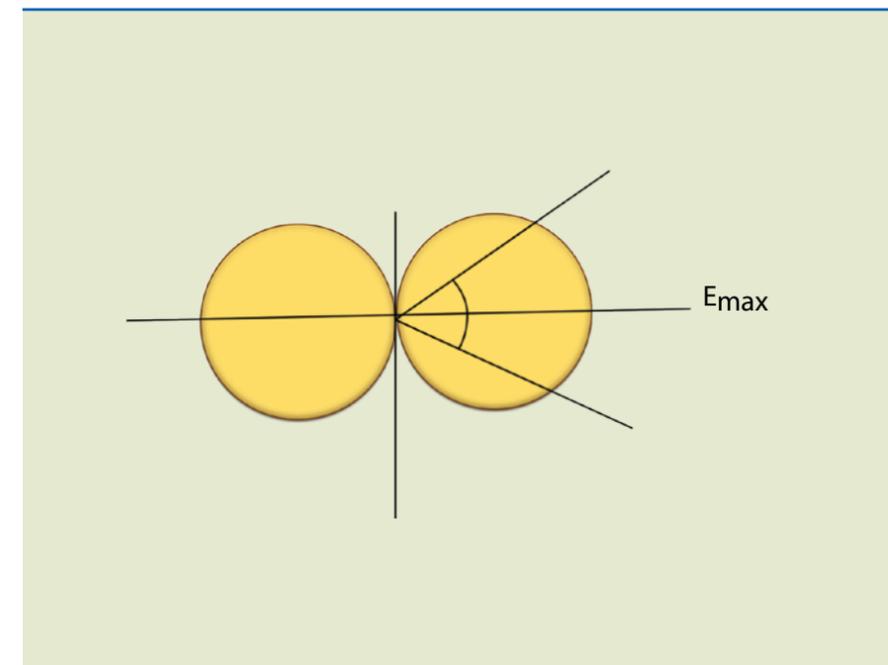


Figura 6.6
Largura de feixe da antena.

6.6 Eficiência η

É a relação entre a potência realmente irradiada por uma antena e a potência a ela entregue pelo transmissor. A parte de potência não irradiada corresponde a perdas por dissipação térmica, fugas de RF nos conectores e isoladores, descasamento de impedâncias e despolarização da onda. Pode ser determinada por:

$$n\% = \frac{P_{ir}}{P_{tx}} \cdot 100 \quad (6.1)$$



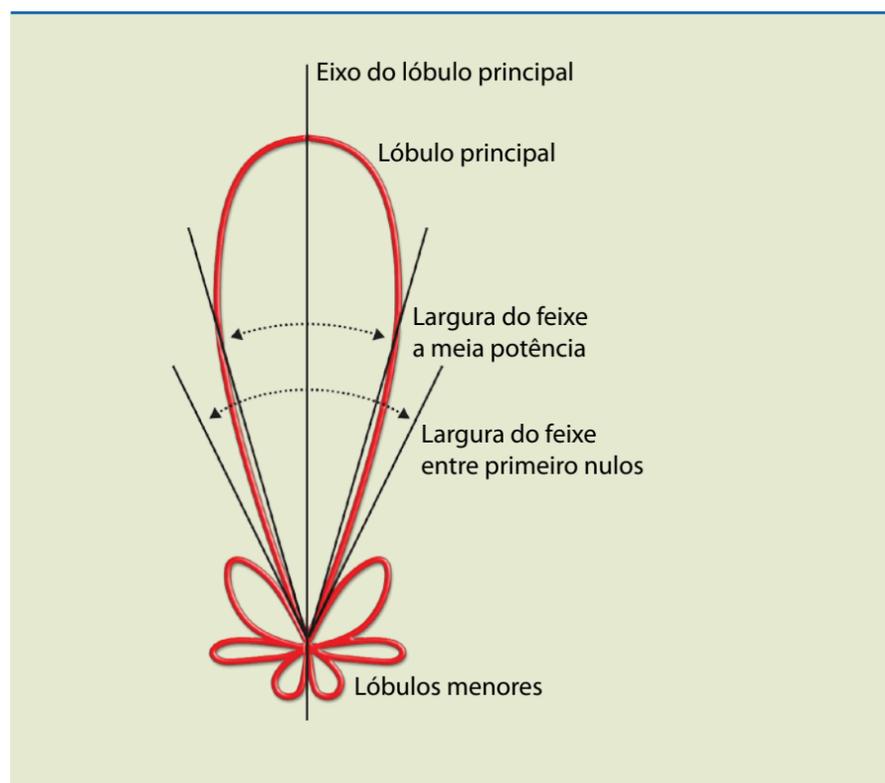
6.7 Diretividade

Direção de maior incidência de irradiação de sinal pela antena, definida pela relação entre o campo irradiado por essa antena em determinada direção e o campo irradiado pela antena isotrópica em determinada potência:

$$D = \frac{E}{E_{\text{iso}}} \quad (6.2)$$

O diagrama de irradiação da antena pode indicar sua diretividade (figura 6.7).

Figura 6.7
Diretividade de uma antena.



Quanto maior for o valor de D , mais diretiva será a antena. Para a antena isotrópica, $D = 1$.

A intensidade de campo irradiado pela antena pode ser determinado pela expressão:

$$E = P_r \cdot r^2 \quad (6.3)$$

em que:

- P_r é a densidade de potência, em watts.
- r , o raio do lóbulo de maior irradiação, em metros.

Para a antena isotrópica, que irradia igualmente em todas as direções, o volume de energia terá o formato de uma esfera, portantoo:

$$P_r = \frac{P}{4\pi r^2} \quad (6.4)$$

6.8 Ganho da antena

É o produto da eficiência pela diretividade da antena, em dBi:

$$G = \eta \cdot D \quad (6.5)$$

6.9 Relação frente-costas

É a relação entre a potência irradiada em uma direção predominante e a potência irradiada no mesmo eixo, mas no sentido oposto, expressa em dB:

$$R_{fc} = 10 \cdot \log \frac{P_f}{P_c} \quad (6.6)$$

6.10 EIRP (effective isotropic radiation power)

É a potência da transmissão aplicada na antena isotrópica que proporciona o mesmo resultado da antena direcional em uso. Muito utilizada em comunicações na faixa de micro-ondas, principalmente em sistemas via satélite, é determinada por:

$$\text{EIRP (dBW)} = P_t \text{ (dBW)} + G \text{ (dBi)} \quad (6.7)$$

em que:

- P_t é a potência de transmissão, em dBW;
- G , o ganho da antena, em dBi.

6.11 Tipos de antenas

Os principais tipos de antenas são: dipolo, dipolo de meia onda, dipolo dobrado, dipolo de quarto de onda, Yagi-Uda e parabólica.

6.11.1 Antena dipolo

Formada basicamente por duas hastes condutoras, alimentadas pelo centro, por meio de uma linha de transmissão (par de fios ou cabo coaxial), por gerador de corrente de



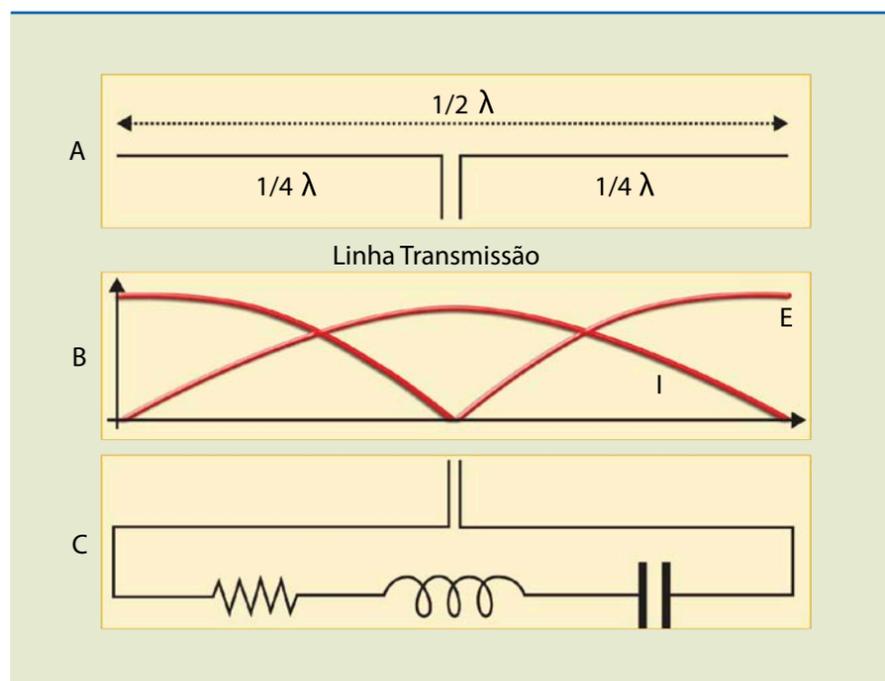
radiofrequência. O comprimento físico das hastes é igual ao comprimento de onda do sinal irradiado, de acordo com sua faixa de frequências de operação.

6.11.2 Antena dipolo de meia onda

Formada por dois condutores retilíneos, cada um com comprimento de $1/4$ do comprimento de onda da radiação a ser emitida ou recebida (figura 6.8).

Figura 6.8

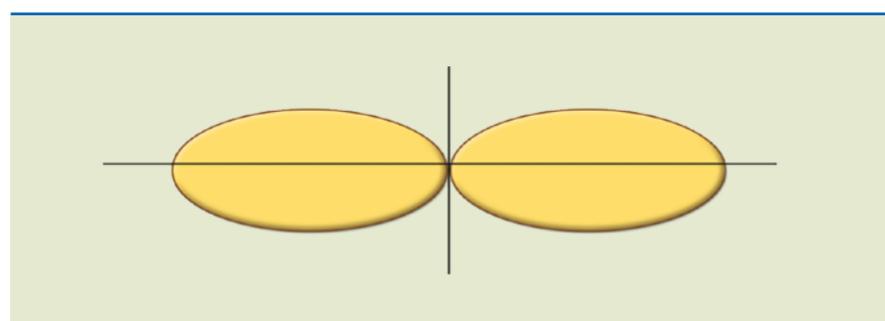
Dipolo de meia onda.



A impedância da antena dipolo de meia onda é de aproximadamente 75Ω . Em relação à largura de feixe, $\alpha = 78^\circ$. Sua relação frente-costas é de 1:1 e o ganho é de 2,15 dBi. O diagrama de irradiação dessa antena é mostrado na figura 6.9.

Figura 6.9

Diagrama de irradiação da antena dipolo de meia onda.



6.11.3 Antena dipolo dobrado

Formada por dois dipolos de meia onda em paralelo. Nessa situação, a impedância é multiplicada por $2^2 = 4$. Portanto, $Z = 4 \cdot 72 = 288 \Omega$. Tem valor

de impedância próximo ao das linhas de transmissão bifilares de 300Ω e é bastante recomendada em sinais de VHF, como nas transmissões de TV (figura 6.10).

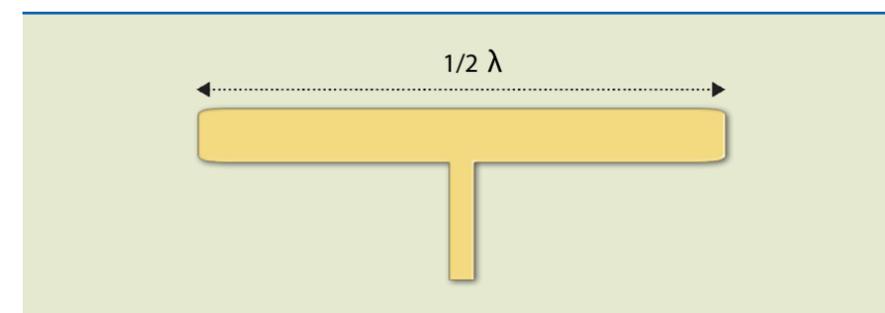


Figura 6.10

Dipolo dobrado.

6.11.4 Antena dipolo de quarto de onda

Muito utilizada em comunicações móveis, tem funcionamento omnidirecional no plano horizontal (figura 6.11). O elemento excitador é um condutor vertical retilíneo de comprimento igual a $1/4$ do comprimento de onda do sinal, que é ligado ao condutor central da linha de transmissão (cabo coaxial). Os elementos auxiliares fazem o plano de terra horizontal e as ondas refletidas interagem com a incidente, resultando em distribuição uniforme no plano horizontal. A impedância característica está na faixa dos 36Ω .

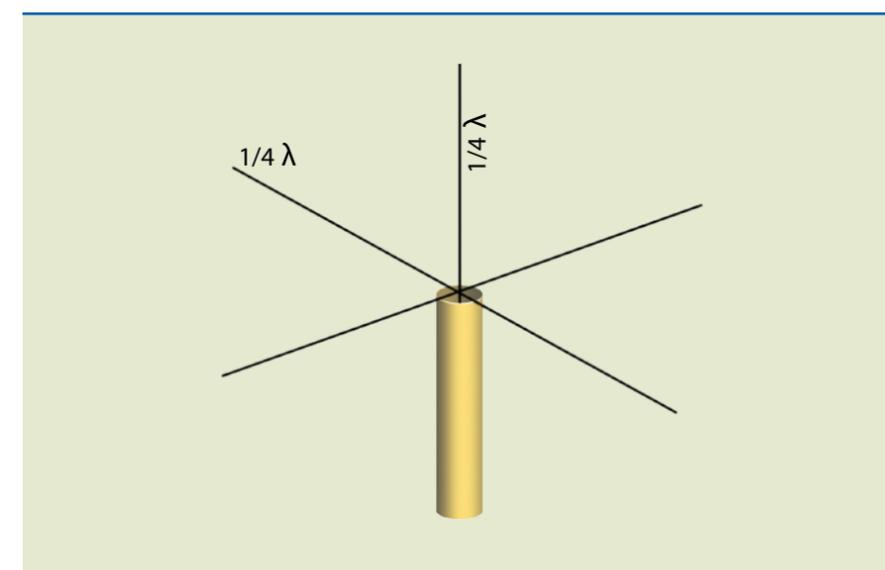


Figura 6.11

Dipolo de quarto de onda.

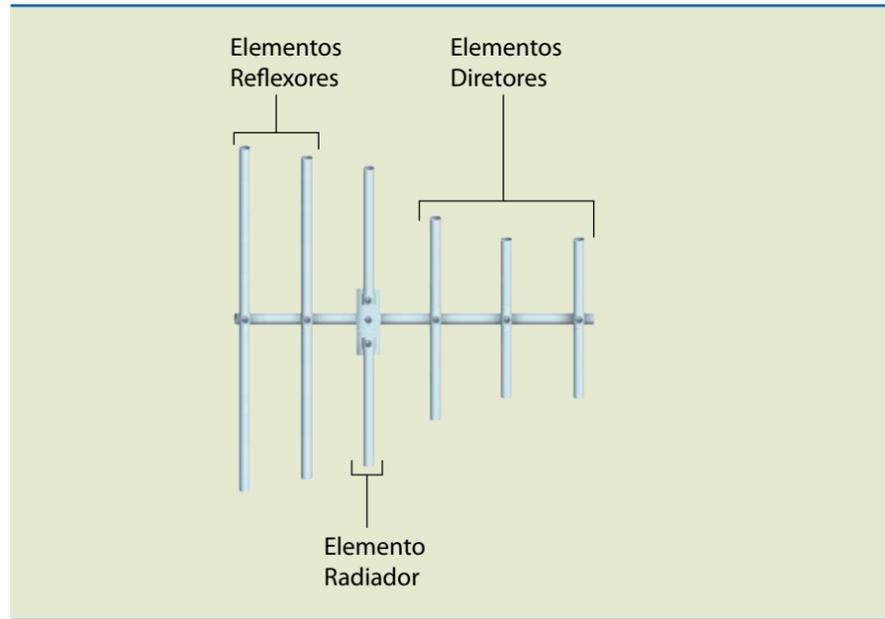
6.11.5 Antena Yagi-Uda

Formada por dipolos em paralelo sobre um mesmo eixo, o principal deles chamado excitador, e elementos parasitas, denominados refletores e diretores, com a função de elevar o ganho da antena e sua relação frente-costas, diminuindo a largura do feixe.



Os refletores ficam posicionados atrás do dipolo principal, funcionando como atenuadores das ondas incidentes pelas costas. Os diretores são posicionados na frente do dipolo principal, com o propósito de aumentar a diretividade da antena. Sua configuração é apresentada na figura 6.12.

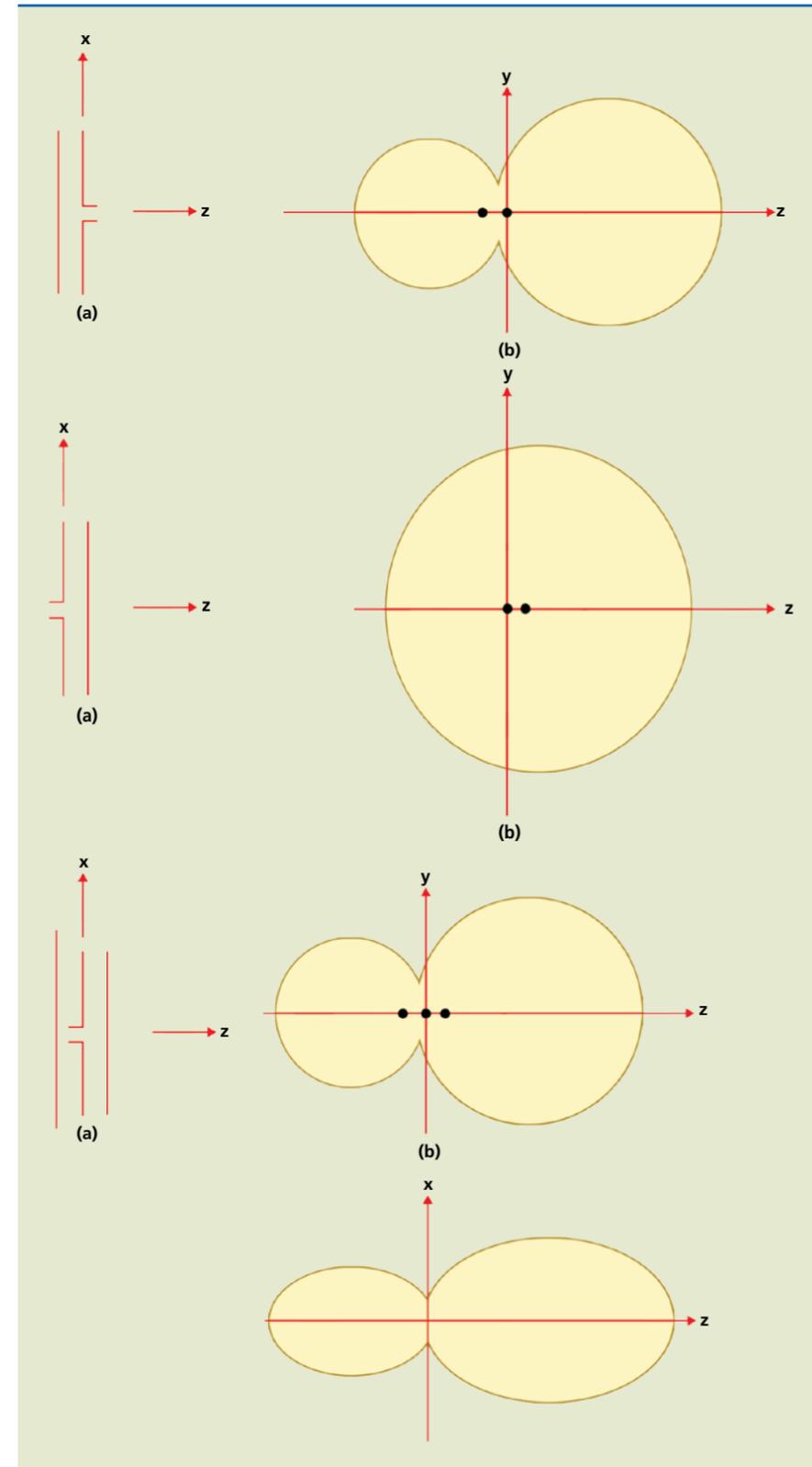
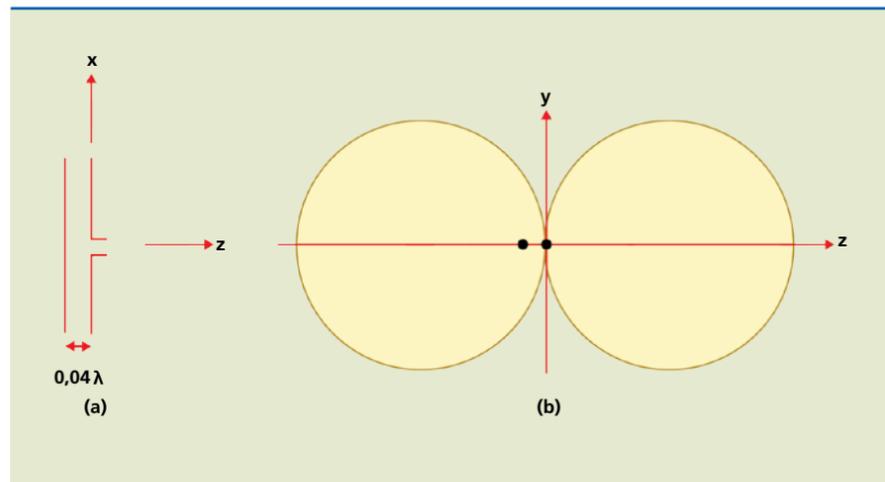
Figura 6.12
Elementos de uma antena Yagi-Uda.



Em sua configuração mais simples, esse tipo de antena possui dipolo radiador, além de um dipolo refletor. O grande número de dipolos refletores e diretores ajuda a aumentar o ganho da antena projetada, em relação a outra com menos dipolos.

A antena Yagi-Uda funciona da seguinte maneira: a alimentação é feita no dipolo principal, o excitador. Essa corrente excita os diretores e os refletores. A reirradiação resulta em uma superposição do campo elétrico no elemento ativo, provocando aumento de ganho. Na figura 6.13 é possível ter uma ideia dos diagramas de irradiação da antena Yagi-Uda, de acordo com o número de elementos que a compõem.

Figura 6.13
Diagramas de irradiação de uma antena Yagi-Uda.



Podemos observar que, à medida que são inseridos elementos parasitas, o diagrama de irradiação da antena é alterado. Os espaçamentos entre os elementos



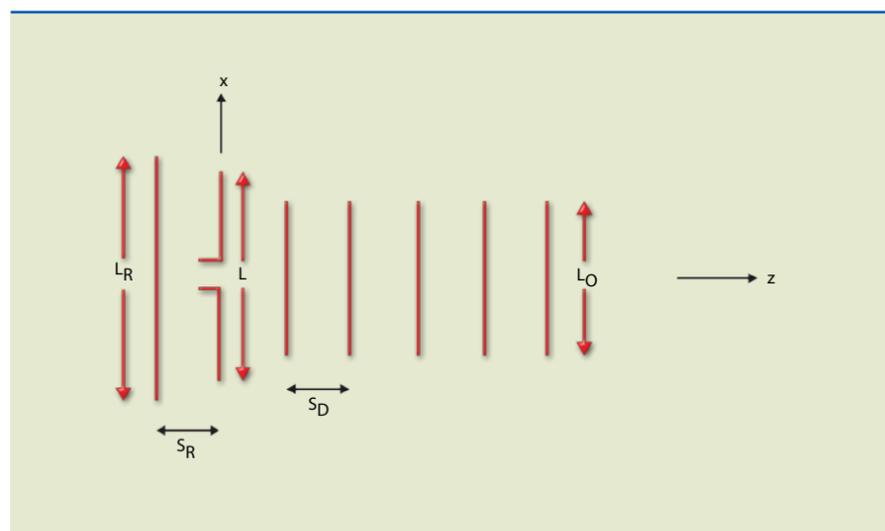
diretor, refletor e ativo e as dimensões desses elementos determinam as características de irradiação e impedância de entrada da antena, como mostram a tabela 6.1 e a figura 6.14, em que:

- N é o número de elementos;
- L_R , o tamanho do refletor;
- L , o tamanho do elemento ativo;
- L_D é o tamanho do diretor.

Tabela 6.1
Características da antena Yagi-Uda

N , nº de Elem.	Espaçamento	L_R	L	L_D	ganho	relação frente/costa	Impedância entrada	HPH	HPE
3	0,25	0,479	0,453	0,451	9,4	5,6	22,3 + j15,0	84	66
4	0,15	0,486	0,456	0,453	9,7	8,2	36,7 + j9,6	84	66
4	0,20	0,503	0,474	0,463	9,3	7,5	5,6 + j20,7	64	54
4	0,25	0,486	0,463	0,456	10,4	6,0	10,3 + j23,5	60	52
4	0,30	0,475	0,453	0,446	10,7	5,2	25,8 + j23,2	64	56
5	0,15	0,505	0,476	0,456	10,0	13,1	9,6 + j13,0	76	62
5	0,20	0,486	0,462	0,449	11,0	9,4	18,4 + j17,6	68	58
5	0,25	0,477	0,451	0,442	11,0	7,4	53,3 + j6,2	66	58
5	0,30	0,482	0,459	0,451	9,3	2,9	19,3 + j39,4	42	40
6	0,20	0,482	0,456	0,437	11,2	9,2	51,3 + j1,9	68	58
6	0,25	0,484	0,459	0,446	11,9	9,4	23,2 + j21	56	50
6	0,30	0,472	0,449	0,437	11,6	6,7	61,2 + j7,7	56	52
7	0,20	0,489	0,463	0,444	11,8	12,6	20,6 + j16,8	58	52
7	0,25	0,477	0,454	0,434	12,0	8,7	57,2 + j1,9	58	52
7	0,30	0,475	0,455	0,439	12,7	8,7	35,9 + j21,7	50	46

Figura 6.14
Relação entre as características técnicas da antena Yagi-Uda.



6.11.6 Antena parabólica

Vimos que, à medida que a frequência do sinal aumenta, seu comprimento de onda diminui, refletindo diretamente no comprimento da antena de transmissão ou de recepção. Desse modo, a antena necessita de um elemento capaz de melhorar a concentração de feixes de onda, ou seja, um refletor. Com tal elemento, a diretividade e o ganho da antena aumentam.

As antenas que operam na faixa de micro-ondas possuem um refletor parabólico, capaz de concentrar os feixes de onda perpendiculares ao plano da antena em um ponto específico, chamado foco, exatamente onde a antena é posicionada (figura 6.15).

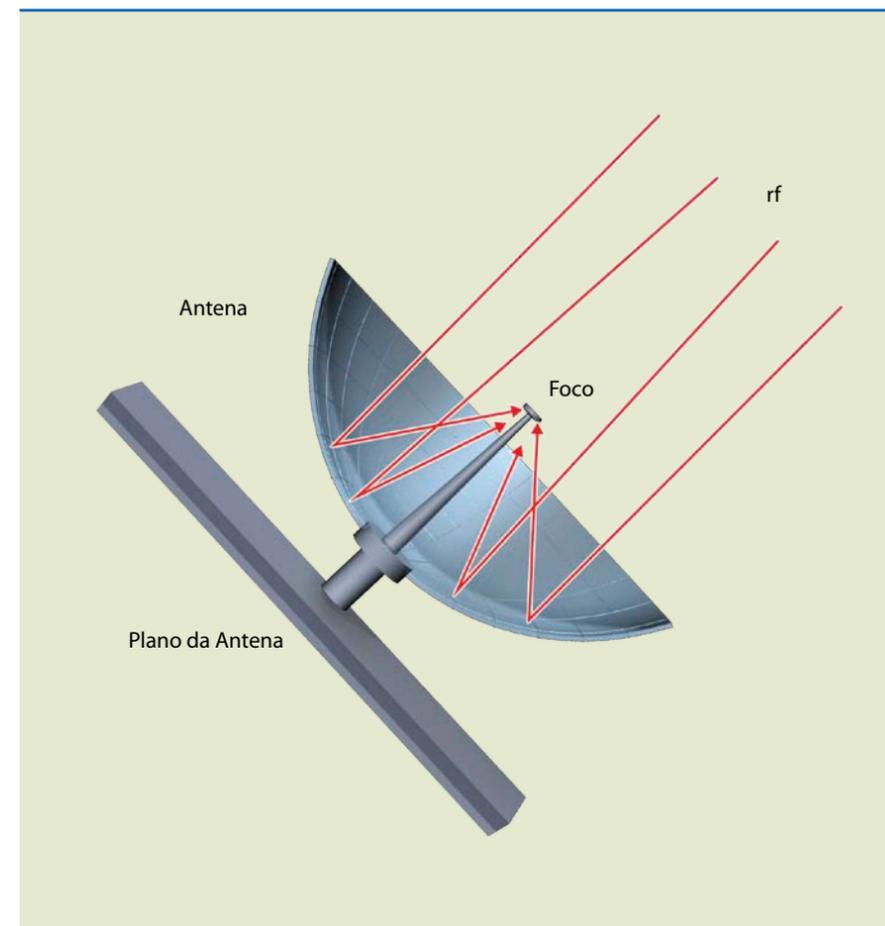


Figura 6.15
Sinais perpendiculares incidindo na parábola.

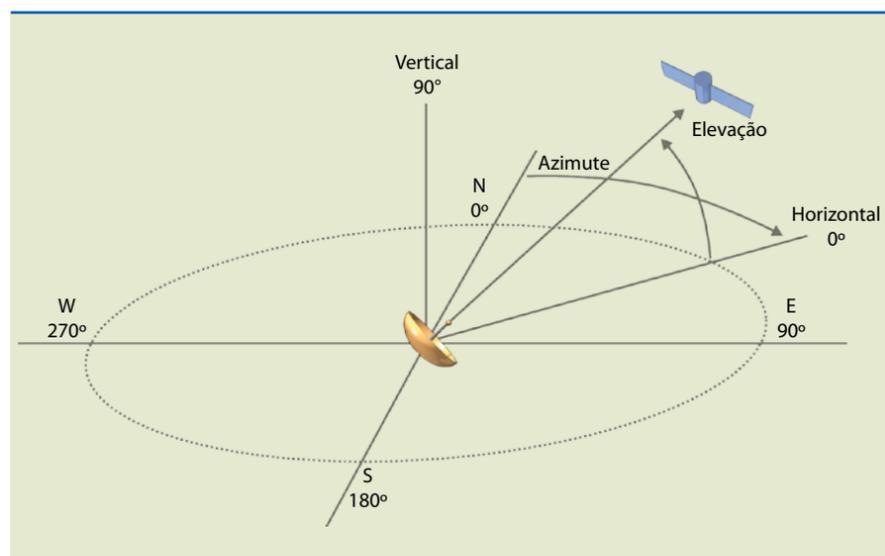
Para o correto posicionamento de uma antena parabólica, é preciso levar em consideração dois aspectos (figura 6.16):

- **Ângulo de elevação** – Inclinação da antena (em graus) em relação ao solo.
- **Azimute** – Posicionamento da antena em relação ao Norte (direita/esquerda). Por exemplo, um azimute de 15° significa que a antena ficará apontada 15° à direita do norte; um azimute de 345°, que a antena ficará 15° à esquerda do norte (345° - 360° = -15°).



Figura 6.16

Posicionamento de uma antena parabólica.



Como a antena parabólica possui diretividade alta, qualquer ângulo de elevação (vertical) ou azimute (horizontal) fora de posição pode causar perda de recepção de um sinal de satélite.

O ganho de uma antena parabólica varia entre 20 e 35 dBi. Entretanto, não apresenta rendimento muito elevado, da ordem de 55%, devido a perdas de energia.

Uma antena parabólica típica para recepção de sinais de satélite é formada por (figura 6.17):

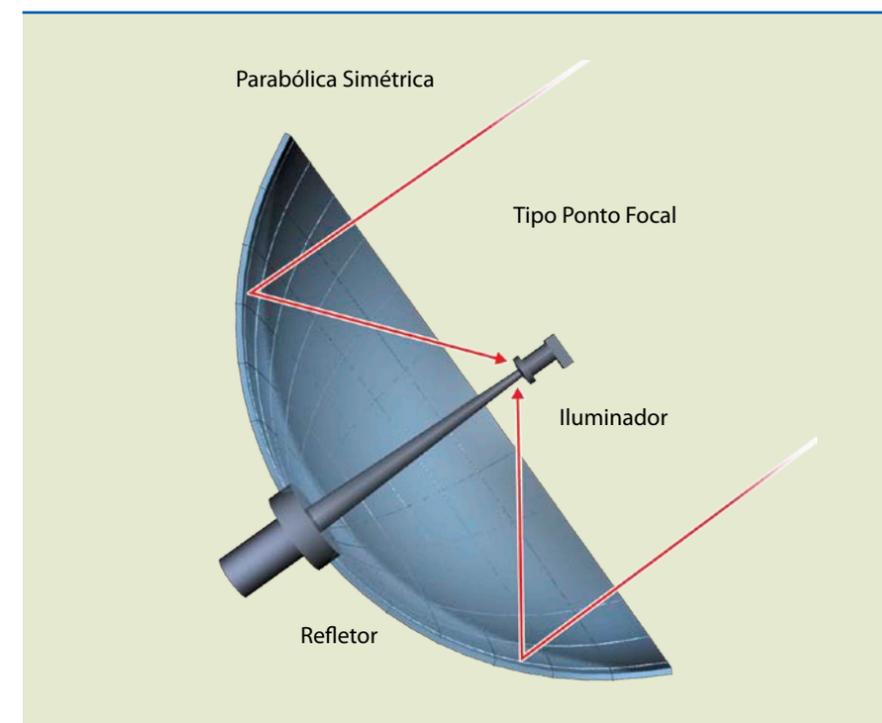
- **Refletor parabólico** – Direciona todo o sinal recebido para o foco.
- **Iluminador** – Segura a corneta corrugada.
- **Corneta corrugada ou *feedhorn*** – Guia os sinais emitidos pelo refletor até o dipolo que fica em seu interior.
- **Polo rotor** – Coloca o dipolo na polarização vertical ou horizontal.
- **Elemento amplificador (LNA, LNB, LNC)** – Amplifica os sinais recebidos. O LNB e o LNC também convertem o sinal recebido para uma frequência mais baixa.

Tipos e diferenças entre os elementos amplificadores:

- **LNA (*low noise amplifier* – amplificador de baixo ruído)** – Faz apenas a amplificação do sinal. Foi o primeiro tipo a ser utilizado, operando na banda C de recepção via satélite, na faixa de 3,7 a 4,2 GHz.
- **LNB (*low noise blockconverter* – conversor de baixo ruído)** – Amplifica o sinal recebido na faixa de 3,7 a 4,2 GHz e o converte para a faixa de 950 a 1 450 MHz. Atualmente é o mais empregado.
- **LNC (*low noise block downconverter* – conversor “abaixador” de baixo ruído)** – Amplifica o sinal recebido e o converte para a frequência de 70 MHz. É usado principalmente na recepção de dados via satélite.

Figura 6.17

Elementos de uma antena parabólica.



Outro tipo de antena parabólica é a **Cassegrain**, de duplo refletor. Seu diferencial é o telescópio desenvolvido por William Cassegrain no século XVII. Nessa antena, o sinal recebido é refletido duas vezes, uma pelo receptor principal e outra pelo sub-refletor, de forma hiperbólica, chegando ao elemento amplificador, posicionado atrás da antena. Para que o elemento amplificador possa receber o sinal, o centro da antena é vazado. A antena Cassegrain apresenta melhor ganho do que a parabólica com um único refletor (figuras 6.18 e 6.19).

Figura 6.18

Incidência de ondas na antena Cassegrain.

