

Meios Físicos Não Guiados.

Os meios físicos não guiados são aqueles em que o sinal do emissor não é conduzido por algum tipo de cabo, sendo propagado pelo ar ou até mesmo pelo vácuo. São as comunicações sem fio. Existem basicamente dois tipos de comunicações sem fio. Através da propagação de ondas eletromagnéticas ou através da emissão de sinais luminosos em espaço aberto.

Esse tipo de comunicação complementa as redes de transmissão com fio, especialmente onde é necessário mobilidade, ou onde é caro, difícil ou mesmo impossível passar cabos.

1. O Espectro Eletromagnético

Quando se movem, os elétrons criam ondas eletromagnéticas que podem se propagar pelo espaço livre (até mesmo no vácuo). Essas ondas foram previstas pelo físico inglês James Clerk Maxwell em 1865 e foram observadas pela primeira vez pelo físico alemão Heinrich Hertz em 1887. O número de oscilações por segundo de uma onda eletromagnética é chamado **frequência**, f , e é medido em **Hz** (em homenagem a Heinrich Hertz). A distância entre dois pontos máximos (ou mínimos) consecutivos é chamada **comprimento de onda**, designada universalmente pela letra grega λ (lambda).

Quando se instala uma antena de tamanho apropriado em um circuito elétrico, as ondas eletromagnéticas podem ser transmitidas e recebidas com eficiência por um receptor localizado a uma distância bastante razoável. Toda a comunicação sem fios é baseada nesse princípio.

No vácuo, todas as ondas eletromagnéticas viajam à mesma velocidade, independentemente de sua frequência. Essa velocidade, geralmente chamada **velocidade da luz**, c , é aproximadamente igual a 3×10^8 m/s, ou **300.000Km/s**, ou ainda cerca de 30cm por nanossegundo. No cobre ou na fibra, a velocidade cai para cerca de 2/3 desse valor e se torna ligeiramente dependente da frequência. A velocidade da luz é o limite máximo que se pode alcançar. Nenhum objeto ou sinal pode se mover com maior rapidez do que ela.

A relação fundamental entre f , λ e c (no vácuo) é:

$$\lambda f = c$$

Como c é uma constante, se conhecermos f , chegaremos a λ e vice-versa. Como uma regra prática, quando λ é medido em metros e f em MHz, $\lambda f \approx 300$. Por exemplo, ondas de 100 MHz têm cerca de 3 m de comprimento, ondas de 1.000 MHz têm 0,3 metros (30 cm) e ondas com 0,1 metro têm uma frequência igual a 3.000 MHz (ou 3 GHz).

O espectro eletromagnético é mostrado na Figura 1. As faixas de rádio, micro-ondas, infravermelho e luz visível do espectro podem ser usadas na transmissão de informações, por meio de modulação da amplitude, da frequência ou da fase das ondas. A luz ultravioleta, os raios X e os raios gama representariam opções ainda melhores, por terem frequências mais altas, mas são difíceis de produzir e modular, além de não se propagarem bem através dos prédios e de serem perigosos para os seres vivos. As bandas (ou faixas) de frequências listadas na parte inferior da Figura 1 são os nomes oficiais definidos pela ITU (*International Telecommunication Union*) e se baseiam nos comprimentos de onda; portanto, a banda *LF* vai de 1 a 10 km (aproximadamente, de 30 kHz a 300 kHz). Os termos *LF*, *MF* e *HF* são as abreviaturas, em inglês, de baixa, média e alta frequência, respectivamente. É claro que, quando esses nomes foram criados, ninguém esperava ultrapassar 10 MHz, de forma que foram atribuídos os seguintes nomes às bandas mais altas surgidas posteriormente: Very, Ultra, Super, Extremely e Tremendously High Frequency. Além desses não há outros nomes.

Um pesquisador chamado Shannon descobriu que o volume de informações que uma onda eletromagnética é capaz de transportar depende da potência recebida e está diretamente relacionado à sua largura de banda. Observando a Figura 1, é possível entender com clareza por que as pessoas

ligadas a redes têm um carinho todo especial pelas fibras ópticas. Muitos GHz de largura de banda estão disponíveis para a transmissão de dados na banda de microondas, e ainda mais na fibra, pois está mais à direita em nossa escala logarítmica. Como exemplo, as fibras ópticas possuem três faixas de frequência mais usadas para a transmissão de sinais luminosos. Uma dessas faixas permite teoricamente alcançar taxas da ordem de 300 Tbps, bastante superior à capacidade da faixa de micro-ondas (TANENBAUM, 2013).

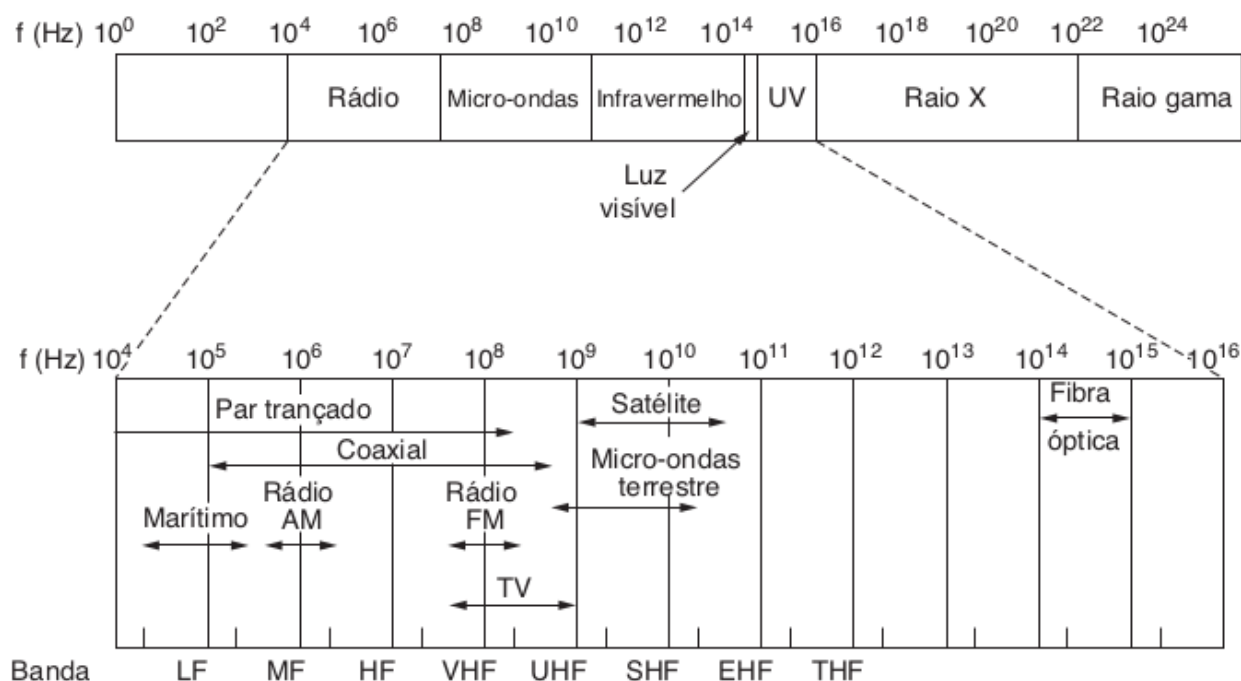


Figura 1. O espectro eletromagnético e a maneira como é usado na comunicação. Fonte: Tanenbaum(2013)

Observe que a escala da figura 1 é logarítmica. Ou seja, a frequência é expressa em potência de 10. Assim, conforme vamos passando para as faixas mais à direita, a cada faixa na escala, a largura real da faixa é 10 vezes maior que a anterior. Assim, pelo exemplo, a faixa usada para comunicação por Satélite é muito maior do que a faixa usada para pares trançados, embora graficamente pareça mais estreita.

Para entender melhor, considere a faixa de pares trançados indo de 10^4 a 10^8 Hz e a faixa de satélites de 10^9 Hz até 10^{10} Hz. Isso significa uma largura de banda do par trançado é de 10^8 Hz - 10^4 Hz, ou seja,

$$100.000.000\text{Hz} - 10.000\text{Hz} = 99.990.000\text{Hz}. \text{ Ou seja, quase } 10^8\text{Hz}.$$

Já a capacidade da faixa dos satélites seria $10^{10}\text{Hz} - 10^9\text{Hz}$, ou seja,

$$10.000.000.000\text{Hz} - 1000.000.000\text{Hz} = 9.000.000.000\text{Hz}. \text{ Ou seja } 9 \times 10^9\text{Hz}, \text{ ou } 9\text{GHz}$$

Observe que para essa simulação (mais restrita do que mostra o gráfico), a faixa de satélites seria 90 vezes mais larga do que a faixa de pares trançados.

2. Transmissão de Rádio

As ondas de rádio são fáceis de gerar, podem percorrer longas distâncias e penetrar facilmente nos prédios; portanto, são amplamente utilizadas para comunicação, seja em ambientes

fechados, seja em locais abertos. As ondas de rádio também são omnidirecionais, o que significa que elas viajam em todas as direções a partir da origem; desse modo, o transmissor e o receptor não precisam estar cuidadosa e fisicamente alinhados.

As propriedades das ondas de rádio dependem da frequência. Em baixas frequências, as ondas de rádio atravessam bem os obstáculos, mas a potência cai abruptamente à medida que a distância da origem aumenta, pois a energia do sinal se espalha por uma superfície maior. Essa atenuação é chamada perda no caminho. Em altas frequências, as ondas de rádio tendem a viajar em linha reta e a ricocheteiar nos obstáculos. A perda do caminho ainda reduz a potência, embora o sinal recebido também possa depender muito das reflexões. Ondas de rádio de alta frequência também são absorvidas pela chuva e outros obstáculos, até certo ponto, mais do que as frequências baixas. Em todas as frequências, as ondas de rádio estão sujeitas à interferência de motores e outros equipamentos elétricos.

É interessante comparar a atenuação das ondas de rádio com a dos sinais nos meios guiados. Com fibra, cabo coaxial e par trançado, o sinal cai pela mesma fração por distância unitária, por exemplo, 20 dB por 100 m para o par trançado. Com o rádio, o sinal cai pela mesma fração enquanto a distância dobra, por exemplo, 6 dB por duplicação no espaço livre. Isso significa que as ondas de rádio podem percorrer longas distâncias, e a interferência entre os usuários é um problema. Por essa razão, todos os governos exercem um rígido controle sobre o licenciamento do uso de transmissores de rádio, com apenas uma exceção, as bandas ISM, descritas mais adiante.

Nas bandas VLF, LF e MF, as ondas de rádio se propagam perto do solo, como mostra a Figura 2. Essas ondas podem ser detectadas dentro de um raio de, talvez, mil quilômetros nas frequências mais baixas; nas frequências mais altas, esse raio é menor. A radiodifusão em frequências AM utiliza a banda MF, razão pela qual as ondas de rádio produzidas pelas estações de rádio AM de Boston não podem ser captadas facilmente em Nova York.

As ondas de rádio nessas bandas atravessam os prédios com facilidade; esse é o motivo por que os rádios portáteis funcionam em ambientes fechados. O principal problema relacionado à utilização dessas bandas para comunicação de dados diz respeito à baixa largura de banda que oferecem.

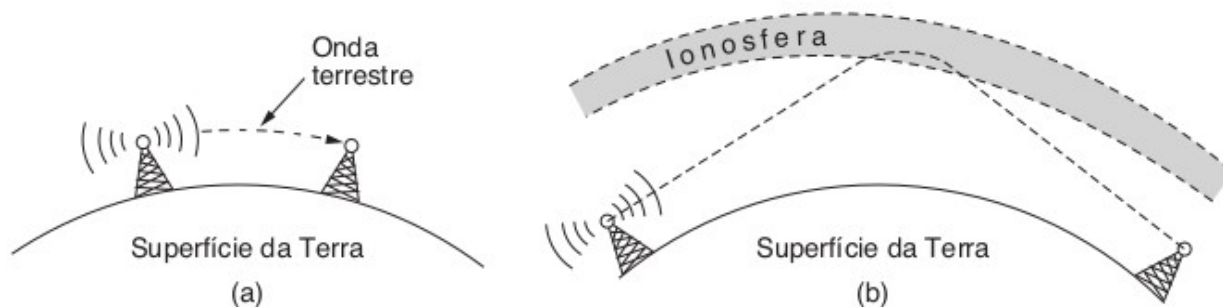


Figura 2. Nas bandas VLF, LF e MF as ondas de rádio obedecem à curvatura da Terra (a). Na banda HF, as ondas se propagam mais próximo da linha reta, e ricocheteiam na ionosfera.

Nas bandas HF e VHF, as ondas que se propagam ao longo do solo tendem a ser absorvidas pela terra. No entanto, as ondas que alcançam a ionosfera, uma camada de partículas carregadas situadas em torno da Terra a uma altura de 100 a 500 km, são refratadas por ela e enviadas de volta à Terra, como mostra a Figura 2(b). Em determinadas condições atmosféricas, os sinais podem ricocheteiar diversas vezes. Os operadores de radioamador utilizam essas bandas em comunicações de longa distância. Os militares também se comunicam nas bandas HF e VHF.

3. Transmissão de Micro-ondas

Acima de 100 MHz, as ondas trafegam praticamente em linha reta e, portanto, podem ser concentradas em uma faixa estreita. A concentração de toda a energia em um pequeno feixe através de uma antena parabólica (como a conhecida antena de TV por satélite) oferece uma relação sinal/ruído muito mais alta, mas as antenas de transmissão e recepção devem estar alinhadas com o máximo de precisão.

Quanto mais alta a frequência, maior a resistência que o sinal sofre para atravessar objetos e paredes, e a partir de 4GHz o sinal já começa a sofrer com a absorção pelas gotas de chuva. Isso muitas vezes provoca problemas em certos canais de satélite. Para os sinais de Wi-Fi, as frequências mais usadas são 2.4GHz e 5.8GHz. Por um lado, a frequência de 2.4GHz tem mais equipamentos instalados, e portanto é mais sujeita a interferências. Por outro lado, possui uma maior facilidade para atravessar paredes. Já a frequência de 5.8GHz costuma ser mais limpa, mas com maior atenuação (perda de potência) ao percorrer a atmosfera, e também ao atravessar paredes, o que reduz o seu alcance.

Alguns provedores de acesso à Internet utilizam equipamentos padrão Wi-Fi projetados para trabalhar em ambiente *outdoor*, para fazer a conexão entre a residência do cliente e o provedor. No caso de uso de rádios com frequência de 5.8GHz, a ocorrência de chuva pode ter uma influência mais significativa no sinal. Por exemplo, caso haja uma árvore entre os dois pontos, em condições de clima seco o sinal pode ser satisfatório, mas durante e após a chuva, em função da presença de água nas folhas, o sinal pode ser prejudicado, justamente pelo fato da frequência 5.8GHz ser mais suscetível à absorção pela chuva.

Outra utilização de micro-ondas para comunicação é para estabelecer enlaces de dezenas de quilômetros entre torres, com instalação mais rápida e barata do que o lançamento de cabos de fibra óptica, dependendo das condições geográficas.

4. Alocação do Espectro e Bandas ISM

As principais aplicações de utilização do espectro eletromagnético exige a reserva para que um emissor não destrua transmissão do outro. Estações de rádio e TV, por exemplo, pagam ao estado pela concessão do espectro em cada região.

A maioria dos governos reserva algumas bandas de frequência, chamadas bandas ISM (Industrial, Scientific, Medical) para uso sem licença. Sistemas para abertura de portas de garagens, telefones sem fio, brinquedos controlados por rádio, dispositivos tipo mouse sem fio e vários outros aparelhos domésticos sem fios utilizam as bandas ISM.

A localização das bandas ISM varia um pouco de país para país. Por exemplo, nos Estados Unidos, dispositivos cuja potência está abaixo de 1 watt podem usar as bandas ISM sem exigir uma licença da FCC (órgão regulador dos EUA). A banda de 900 MHz era usada para as primeiras versões do 802.11, mas está sobrecarregada. A banda de 2,4 GHz está disponível na maioria dos países e é bastante usada para 802.11b/g e Bluetooth, mas é sujeita a interferências de fornos de micro-ondas e instalações de radar. A banda de 5.8GHz é menos utilizada.

Essas mesmas bandas também são utilizadas, por exemplo, para telefones sem fio. Se os projetos de equipamentos diferentes que utilizam a mesma frequência (por exemplo, wi-fi, bluetooth e telefones sem fio) não considerarem a coexistência, é possível que um equipamento gere interferência nos outros.

Por exemplo, se a pessoa tiver um telefone sem fio de 2.4GHz no mesmo ambiente de um Wi-Fi de 2.4GHz, pode ser que ouça um chiado na ligação telefônica enquanto o Wi-Fi estiver em uso, ou que a comunicação Wi-Fi comece a falhar toda vez que o telefone for usado. Padrões mais recentes de Bluetooth e Wi-Fi consideram a coexistência. Já outros equipamentos que não precisam se comunicar com equipamentos de outros fabricantes, nem sempre seguem um padrão da indústria, e podem gerar e sofrer interferência.

5. Antenas

O sinal eletromagnético é gerado por um equipamento de rádio e conduzido até uma antena, que irradia o sinal para a atmosfera (ou vácuo, no caso de satélites). A dispersão da energia do sinal pode se dar de diversas formas, de acordo com o projeto da antena.

A tendência natural das ondas eletromagnéticas é se propagar em todas as direções, dispersando a energia igualmente. Isso pode ser muito útil por exemplo para emissoras de rádio difusão (AM e FM) e TV, mas não é a melhor opção para estabelecer um enlace de dados entre dois pontos distantes. Para isso existem tipos diferentes de antenas que direcionam a dispersão da energia das ondas de diferentes formas.

Um parâmetro para a escolha de antena é o ganho que ela oferece. Esse ganho se refere a quanto essa antena consegue redirecionar a energia dos sinais, e é medido em dBi. A grosso modo, cada ganho de 3 dBi, significa que o sinal tem o dobro da energia. A cada perda de -3 dBi, significa que o sinal perdeu metade da sua potência. Então, uma antena de 3 dBi concentra o sinal de modo a dobrar a sua intensidade, no sentido em que concentra sua dispersão. Se o ganho for de 6 dBi, o ganho é de 4 vezes. Se for de 9 dBi, o ganho é de 8 vezes, 12 dBi = 16 vezes, 15 dBi = 32 vezes.

Por outro lado, é importante entender que antenas passivas não amplificam o sinal, apenas concentram a energia do sinal emitida pelo rádio em uma determinada região. Então, de modo geral, quanto maior o ganho da antena, mais concentrado será o direcionamento da energia. Existem antenas que incorporam um amplificador, este sim usa energia elétrica para aumentar a potência do sinal que chega do rádio.

Cada tipo de antena irradia o sinal de uma forma diferente, e isso é expresso em um diagrama de irradiação.

Existem muitos tipos de antenas diferentes, e veremos aqui três tipos mais comuns em comunicação de dados: Omnidirecional, Parabólica e Setoriais.

5.1 Antenas Omnidirecionais.

As antenas Omnidirecionais dispersam a energia das ondas eletromagnéticas de modo aproximadamente uniforme em todas as direções, sobre o plano perpendicular ao seu eixo. Ou seja, se a antena está em uma posição vertical, a energia é dispersada uniformemente sobre o plano horizontal, ao redor da antena. Existem antenas omnidirecionais para uso interno (por exemplo na maioria dos Access Points Wi-Fi), e para uso externo (por exemplo, emissoras de rádio AM/FM, e de TV).

A figura 3 mostra um exemplo duas antenas omnidirecionais internas, uma de 2.2 dBi (a menor) e outra de 5 dBi (a maior).



Figura 3. Antenas omnidirecionais para uso interno, de 2.2 dBi e 5 dBi. Fonte: <https://www.hardware.com.br/tutoriais/alcance-antenas-conectores-potencia/pagina2.html>

O esquema de irradiação desse tipo de antena costuma ser aproximadamente uniforme em 360 graus no plano horizontal (perpendicular ao eixo da antena), como se estivesse olhando a antena de cima. Já no plano vertical (olhando a antena de lado), se aproxima do formato de uma maçã, conforme ilustrado na figura 4.

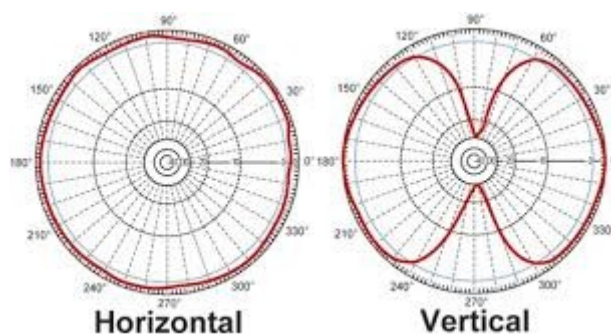


Figura 4. Diagrama de irradiação de uma antena omnidirecional de 2.2 dBi

A título de comparação, uma antena externa, com ganho maior, de 15 dBi, para 2.4 GHz é apresentada na figura 5, e o seu diagrama de irradiação apresentado na figura 6. Observe que a dispersão do sinal fica muito mais achatada, ou seja, tem um alcance maior no plano horizontal, mas diminui bastante a dispersão fora do plano horizontal, conforme ilustrado na figura 7.



Figura 5. Exemplo de antena omnidirecional para uso externo, com ganho de 15 dBi. Fonte: loja.aquario.com.br

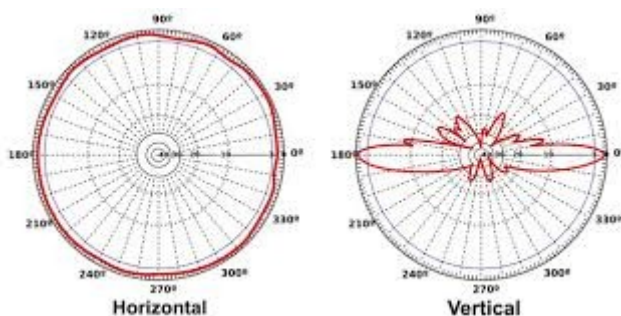


Figura 6. Diagrama de irradiação de uma antena omnidirecional com ganho de 15 dBi.

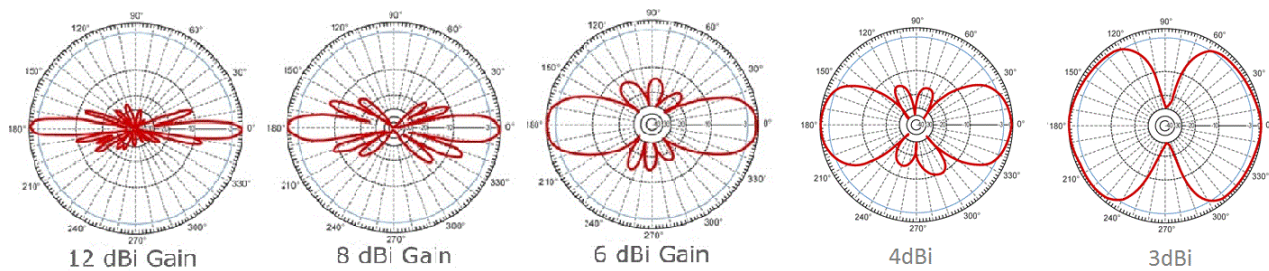


Figura 7. Diagramas de dispersão vertical de antenas omnidirecionais, com ganhos diferentes.
Fonte: <https://under-linux.org/showthread.php?t=178355>

5.2 Antenas Parabólicas

As antenas parabólicas são projetadas para concentrar o máximo possível da energia do sinal em um feixe paralelo, buscando otimizar o alcance do sinal em uma única direção. O formato da antena segue o formato de uma parábola, com o emissor/receptor do sinal situado no foco da parábola. Pode-se fazer a analogia com o funcionamento de um farol de um carro, onde a lâmpada se situa no foco da parábola e a energia luminosa da lâmpada é concentrada em uma única direção, alcançando uma distância maior.

Assim como as antenas omnidirecionais, existem antenas parabólicas para diversas frequências e aplicações, incluindo as populares antenas de recepção de sinal de satélite até as usadas para transmissão de dados em sinal de Wi-Fi, conforme ilustrado na figura 8.

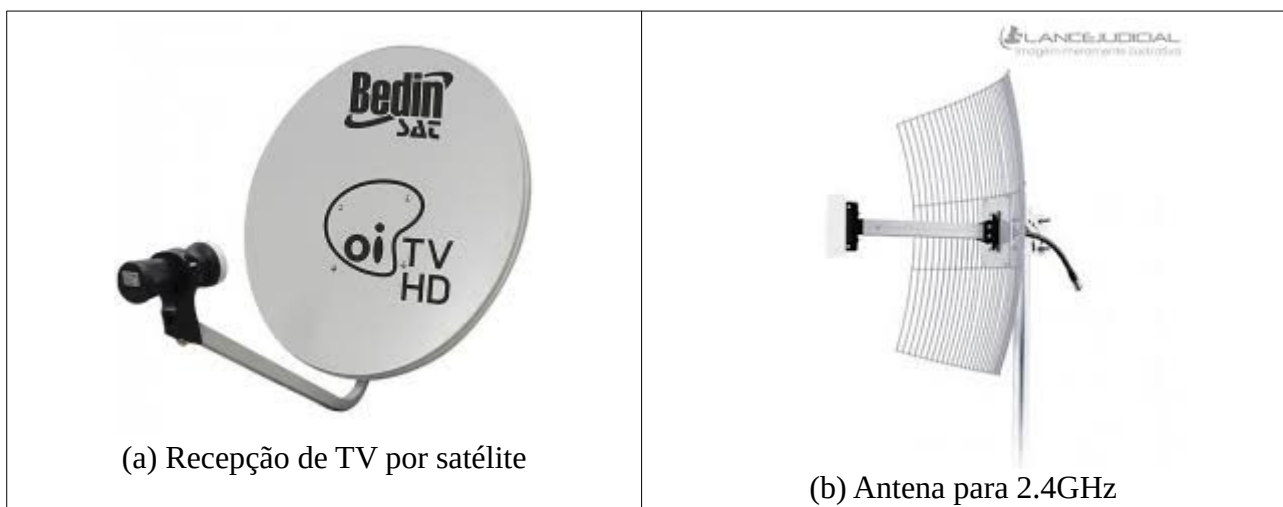


Figura 8. Antenas parabólicas.

O diagrama de irradiação de uma antena parabólica ilustra a concentração da energia do sinal para frente, em um foco mais estreito, e com alcance maior, conforme a figura 9.

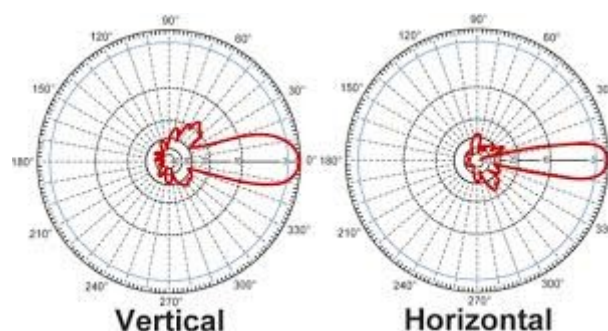


Figura 9. Diagrama de irradiação de uma antena parabólica

As antenas parabólicas normalmente são usados para enlaces com maior distância, normalmente ponto-a-ponto, embora não haja restrição a conectar vários equipamentos clientes a um único ponto de acesso, em uma conexão multiponto, desde que os equipamentos se encontrem alinhados dentro da área de alcance do sinal.

5.3 Antenas Setoriais

Um tipo de antena com um padrão de dispersão intermediário entre a omnidirecional e a parabólica é a antena setorial. O objetivo é redirecionar o sinal para um setor, mas com um ângulo não tão estreito quanto a parabólica. Existem antenas setoriais com ângulo de dispersão de 60° , 90° ou 120° , por exemplo. Esse tipo de antena é frequentemente usado em torres de telefonia celular. Para cobrir uma área de 360° ao redor da torre, são usadas várias antenas setoriais. Por exemplo, podem ser usadas 4 antenas de 90° , embora muitos projetos considerem o uso de uma certa sobreposição, por exemplo, usando 4 antenas de 120° . Para projetos de provedores de acesso sem fio à Internet, nem sempre é necessário cobrir 360° , por exemplo se em algum dos lados não houver assinantes. Esse tipo de antena frequentemente tem uma dispersão vertical praticamente reto na parte superior, mas com um ângulo mais acentuado para baixo (alcançando pedestres na rua próximos à torre, por exemplo).

A figura 10 traz um exemplo de uma antena setorial, e um diagrama de irradiação típico desse tipo de antena.

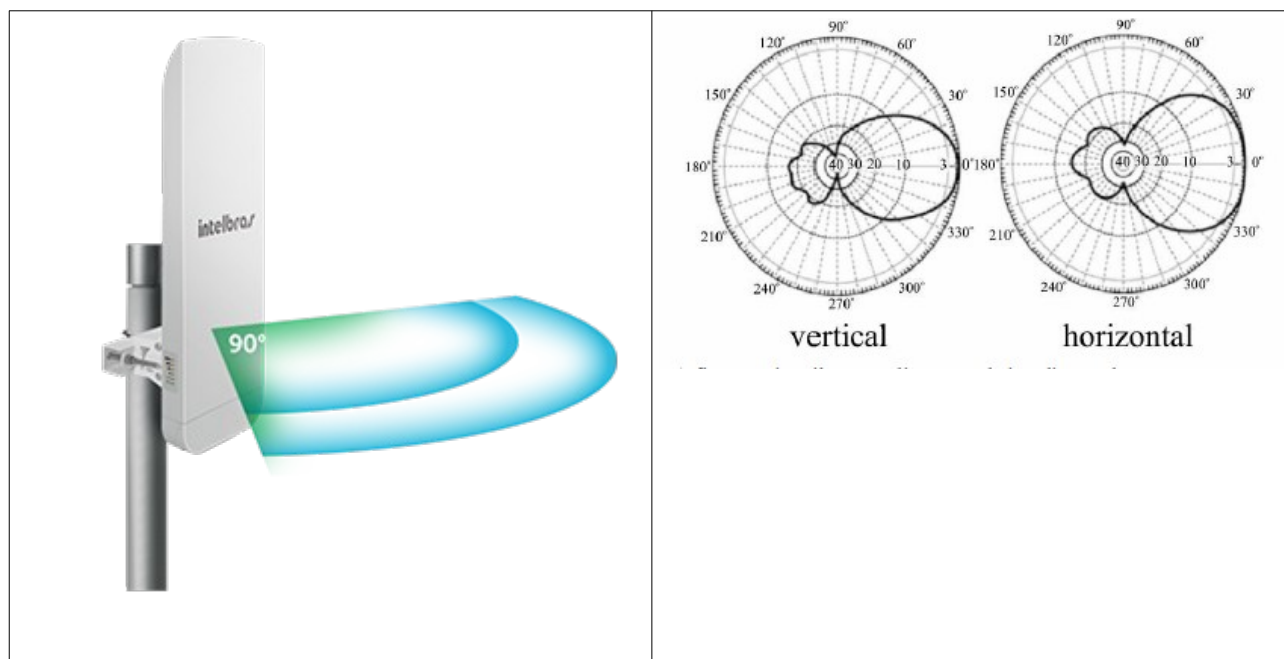


Figura 10. Exemplo de antena setorial, com um diagrama de irradiação típico.

Em geral, a antena é só uma peça mecânica para irradiação e captação de sinal eletromagnético, ligada por um cabo coaxial a um rádio, que pode estar a uma distância de alguns centímetros até alguns metros. Entretanto é comum encontrarmos atualmente equipamentos de rádio com uma antena acoplada. A imagem da figura 10 representa um rádio Access Point Wi-Fi para uso externo, com uma antena setorial embutida com cobertura de 90° .

6. Transmissão Óptica Sem Fio

A transmissão de dados sem fio também pode ser feita através da emissão de sinais luminosos, seja na faixa do espectro do infravermelho, luz visível ou ultravioleta. A transmissão usando infravermelho é bastante usado em curtas distâncias, como por exemplo na maioria dos controles remotos de aparelhos domésticos (TV, som, ar condicionado, etc). Esses controles são relativamente econômicos, fáceis de montar e confiáveis.

Por trabalhar com luz, tem uma característica importante, de não atravessar objetos opacos. Isso pode ser uma desvantagem por limitar o alcance de uma transmissão, mas por outro lado, pode ser útil por questões de segurança. Por exemplo, por essa característica, o controle remoto do vizinho do apartamento ao lado não interfere na sua TV através da parede.

Em redes de computadores, uma aplicação comercial existente é a chamada **FSO (Free Space Optics**, ou Óptica de Espaço Livre), que permite conectar as redes locais de dois edifícios por meio de feixes de laser ou led instalados nos telhados ou janelas. Por sua própria natureza, a transmissão óptica usando raios laser ou led é unidirecional; assim, cada prédio precisa de seu próprio emissor de led ou raio laser e de seu próprio fotodetector. Esse esquema oferece uma largura de banda muito alta e é relativamente seguro, pois é difícil interceptar um raio laser estreito. Ele também é relativamente fácil de ser instalado e, ao contrário das micro-ondas, não precisa de uma licença da agência reguladora (no Brasil, a Anatel).

A potência do laser, um feixe muito estreito, também é uma desvantagem aqui. Apontar um raio laser de 1 mm para um alvo de poucos centímetros a 500 metros de distância é um desafio. Normalmente, são colocadas lentes no sistema para tirar um pouco do foco do raio. Quando é usado o led, que não tem o foco tão estreito quando o laser, as lentes são usadas para concentrar o foco do sinal luminoso. Para aumentar a dificuldade, trepidações dos edifícios, mudanças no vento e na temperatura podem distorcer o raio, e os feixes de raios laser ou de led de fato não podem atravessar chuva ou neblina espessa, mas normalmente funcionam bem em dias ensolarados.

Há diversos fabricantes no mercado oferecendo soluções comerciais de FSO, com velocidades da ordem de 1Gbps ou mais, e um alcance em geral da ordem de 1Km, mas existem equipamentos de FSO com capacidade para estabelecer um link full duplex com velocidade de 30Gbps, ou com alcance de até 4Km, como o exemplo da figura 11.



Figura 11. Transmissor e receptor FSO, com capacidade de até 30Gbps. Fonte:

<http://www.ecsystem.cz/en/products/free-space-optic-equipment>

Observe que o equipamento FSO da figura 11 apresenta duas lentes. Atrás de uma das lentes é instalado o emissor de luz (led ou laser), e atrás da outra é instalado o fotodetector, que recebe o sinal luminoso e converte para bits. Para estabelecer um enlace é necessário um par desses equipamentos.

Além das soluções comerciais de FSO, existe um projeto de hardware livre chamado **Ronja** (<http://ronja.twibright.com/>), onde o interessado pode encontrar todo o projeto para produzir seu link óptico sem fio.