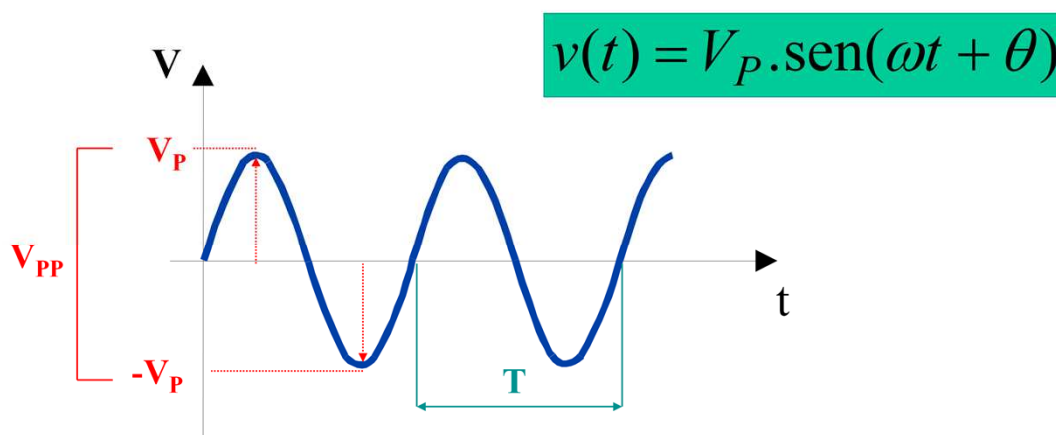


SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO WIRELESS



Rádio Propagação e Antenas

Sinais Senoidais



Onde: V_P = Valor de pico (volts) t = tempo (seg)

T = Período (segundos) ω = velocidade angular (rd/s)

θ = ângulo de fase (graus)

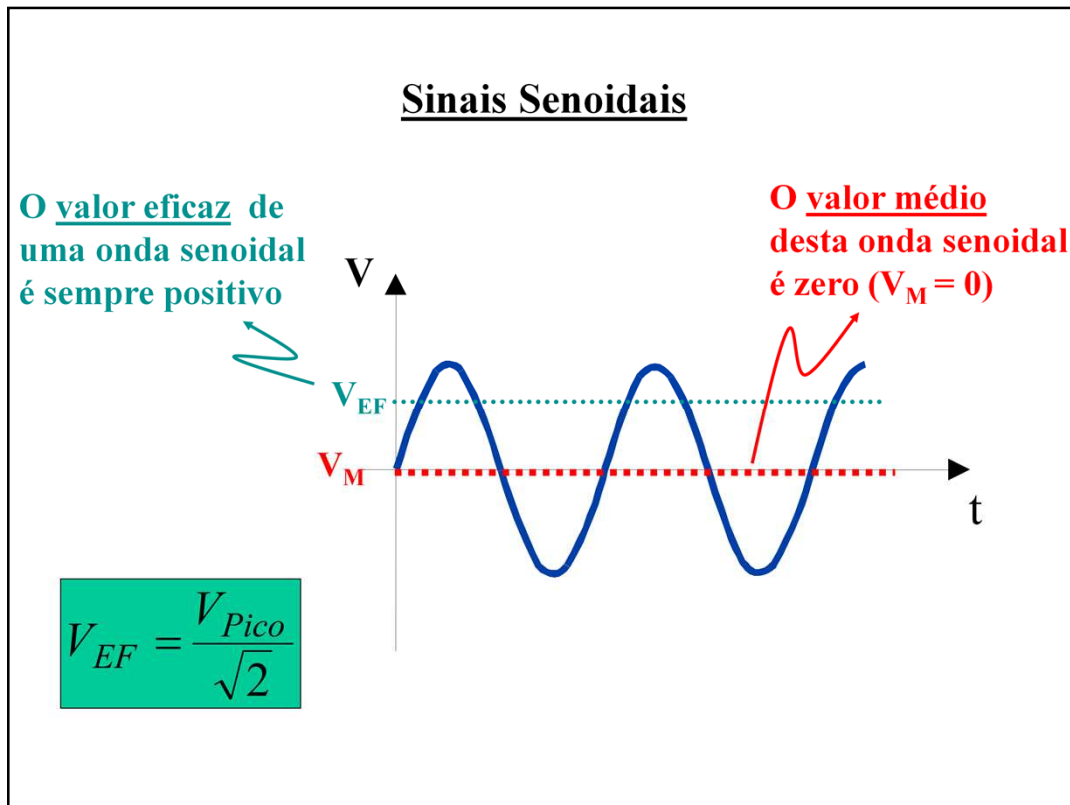
Valor de Pico ou Amplitude : valor de pico de uma onda é o valor máximo que a onda atinge dentro de um período. A figura acima exemplifica como medir este parâmetro em ondas senoidais . É possível distinguir o valor de pico positivo (o maior valor positivo atingido) do valor de pico negativo” (o valor mais negativo atingido). Para aquelas ondas nas quais estes dois valores são idênticos, denomina-se o valor de pico por “**amplitude**”. Tais ondas são ditas “ondas simétricas em amplitude”. O símbolo utilizado para representar o valor de pico é “ **V_p** ”, ou “ **V_{p+}** ” e “ **V_{p-}** ” para os valores de pico positivo e negativo, respectivamente.

Período : A segunda característica de uma onda periódica também é muito óbvia: seu **período**. Vem da própria definição: “onda periódica é aquela que repete todo um padrão de comportamento a intervalos de tempo fixos, ou seja, sempre iguais”. Este “intervalo de tempo fixo” é denominado **período**. Você poderá encontrar nomes alternativos para o período, como: “tempo de ciclo” ou simplesmente “ciclo”. O símbolo utilizado para representar o período é a letra “ **T** ”.

Valor de Pico a Pico : O valor de pico a pico de uma onda é a diferença entre os valores máximo e mínimo que a onda atinge dentro de um período, ou seja:

$$V_{pp} = V_{p+} - V_{p-}$$

O símbolo utilizado para representar o valor de pico a pico, conforme usado acima, é “ **V_{pp}** ”. A figura acima exemplifica como medir este parâmetro em ondas senoidais.



Valor Médio : O valor médio de uma onda é a média de todos os valores assumidos pela onda durante um período.

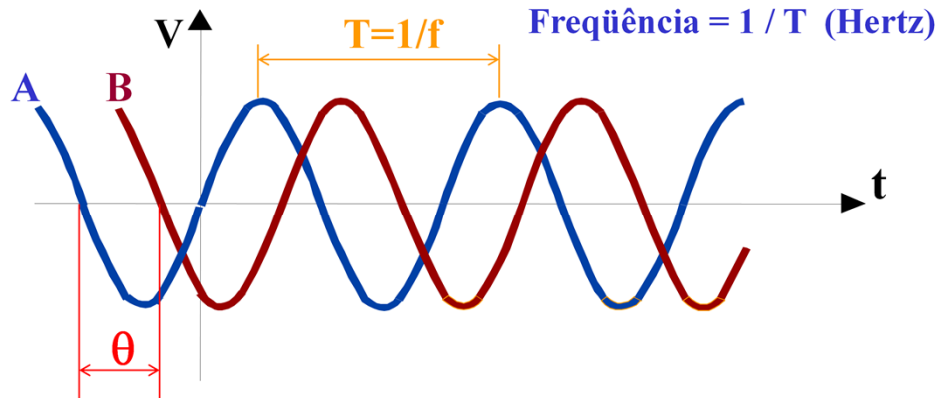
Pensando com relação a uma onda qualquer, seu valor médio também é um “valor equivalente”, o qual “jamais enxergaremos ao observar a onda”. Logo, o valor médio não pode ser medido através do osciloscópio, pois não é visível. As únicas formas de obtê-lo são através de cálculos, muitas vezes complexos, ou de medidas através do **multímetro na escala CC.**

O símbolo utilizado para representar o valor médio é “**V_{cc}**” ou “**V_M**”.

Valor Eficaz : O valor eficaz, ou “valor médio quadrático”, de uma onda é o valor de tensão ou de corrente contínua que, se aplicado a um resistor, provocaria a mesma dissipação de potência que a aplicação da própria onda ao mesmo resistor provoca. É o valor da parcela da onda que efetivamente “realiza trabalho”, daí o nome de **valor eficaz.** O valor eficaz de uma onda qualquer também é um “valor equivalente”, o qual “jamais enxergaremos ao observar a onda no osciloscópio”. Logo, o valor eficaz não pode ser medido através do osciloscópio, pois não é visível. As únicas formas de obtê-lo são através de cálculos, muitas vezes complexos, ou de medidas através do **multímetro na escala CA.** O símbolo utilizado para representar o valor médio é “**V_{ca}**”, “**V_{ef}**”, ou “**V_{RMS}**”. A figura acima exemplifica como medir este parâmetro em ondas senoidais. Repare que o “valor eficaz é sempre positivo”.

Uma relação importante na vida prática de um técnico em eletrônica é dada pela equação abaixo, que dá o valor da tensão de pico de uma onda senoidal em função de seu valor eficaz. $V_p = 1,41 * V_{ef}$ ou $V_{ef} = 0,707 * V_p$

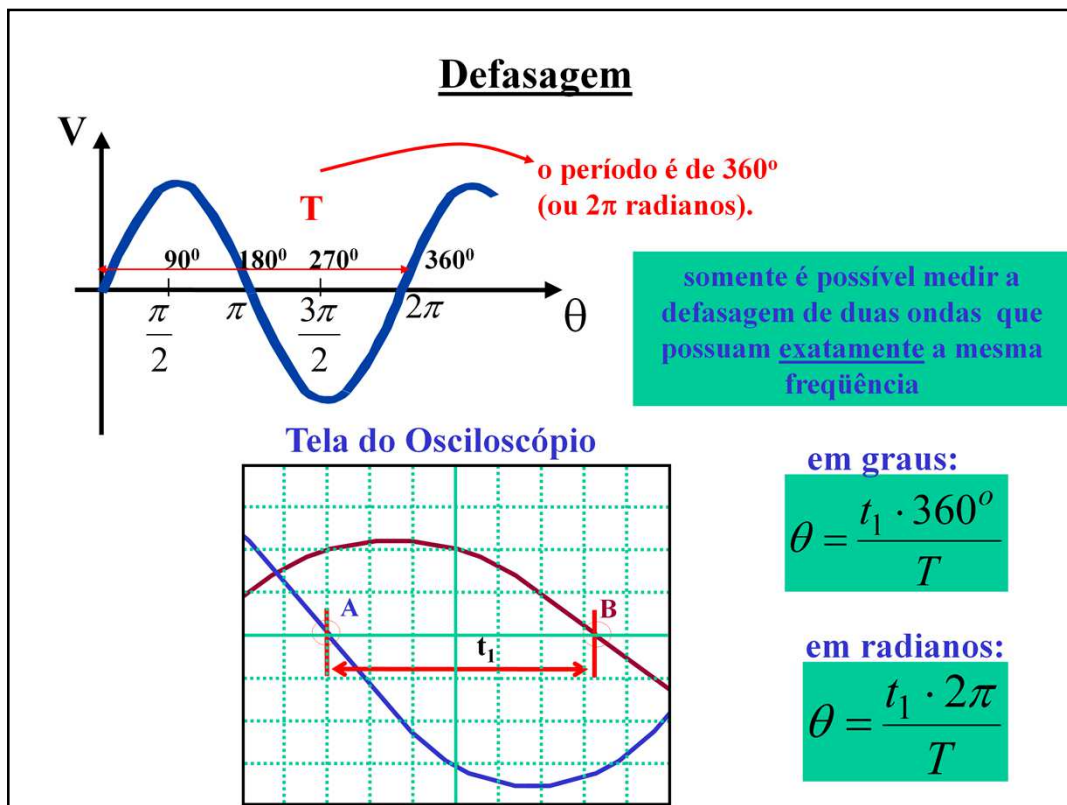
Sinais Senoidais



θ = Defasagem de A em relação a B. Neste caso A está adiantado em relação a B

Frequência : A frequência de uma onda nada mais é que o inverso do período. O símbolo utilizado para representar a frequência é “f”. Num osciloscópio mede-se, na realidade, o período da onda, para, então, calcular a frequência através da seguinte fórmula:

$$f = \frac{1}{T}$$



Fase : A fase de uma onda é a medida do atraso (ou adiantamento) de uma onda em relação à outra. Sempre deve ser medida em relação a uma segunda onda de mesma frequência da primeira. A Figura.acima exemplifica a medição da fase entre as duas ondas. Repare que se diz que a onda **A** está **adiantada** em relação à onda **B**. O símbolo utilizado para representar a fase é “ θ ” (letra grega “teta”), ou “ ϕ ” (letra grega “fi”). Num osciloscópio a fase, também denominada “defasagem” ou “diferença de fase”, é medida em unidades de tempo, mas deve ser convertida para **graus** ou para **radianos** através da aplicação das Equações abaixo.

Em graus:

$$\theta = \frac{t_1 \cdot 360^\circ}{T}$$

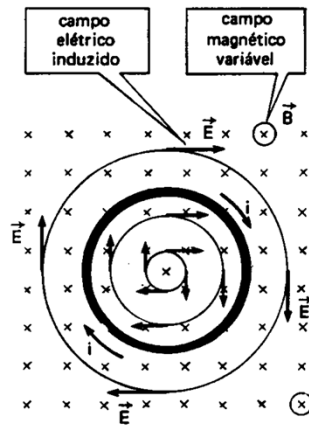
Em radianos:

$$\theta = \frac{t_1 \cdot 2\pi}{T}$$

É de extrema importância saber que somente é possível medir o defasamento de **ondas que possuam exatamente a mesma frequência**, pois, caso contrário, o defasamento não será constante porque uma onda é “mais rápida” que a outra.

Onda Eletromagnética

O fenômeno da indução eletromagnética ocorre quando existe a indução de uma tensão ou corrente elétrica em um circuito, através da variação de fluxo magnético, conforme esta representado na figura:



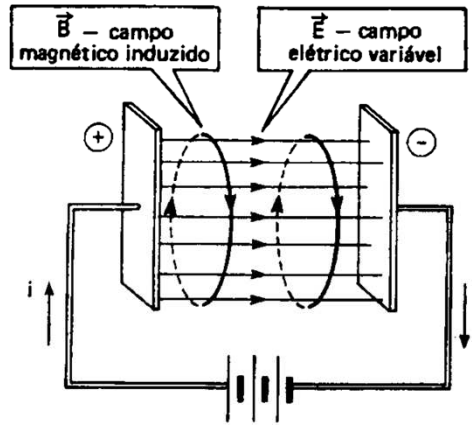
Observe na figura acima, que a variação do campo magnético provoca o aparecimento de um campo elétrico e este induz o movimento dos elétrons no interior da espira. Portanto:

Um campo magnético variável faz aparecer um campo elétrico.

Esta conclusão acrescenta mais um dado no estudo realizado sobre campo elétrico, pois elimina a necessidade da presença de uma carga elétrica para existir um campo elétrico. Isto é, o campo elétrico pode ser produzido tanto por cargas elétricas quanto por um campo magnético variável.

Onda Eletromagnética

Formação de um campo magnético no interior de um capacitor devido a variação do campo elétrico.



Partindo desta descoberta, o físico Maxwell, no século passado, levantou a hipótese do fenômeno inverso também ocorrer, ou seja, um campo elétrico variável criar um campo magnético. Sendo assim, um campo magnético poderia ser gerado tanto por cargas elétricas em movimento como pela variação de um campo elétrico.

Maxwell realizou vários estudos e comprovou a veracidade da sua hipótese. Consequentemente se em um ponto do espaço for estabelecido um campo elétrico variável, este campo originará, em pontos próximos, um campo magnético variável que dará origem a um novo campo elétrico variável, que por sua vez induzirá outro campo magnético e, assim, sucessivamente. Ocorre portanto, a propagação de um distúrbio eletromagnético.

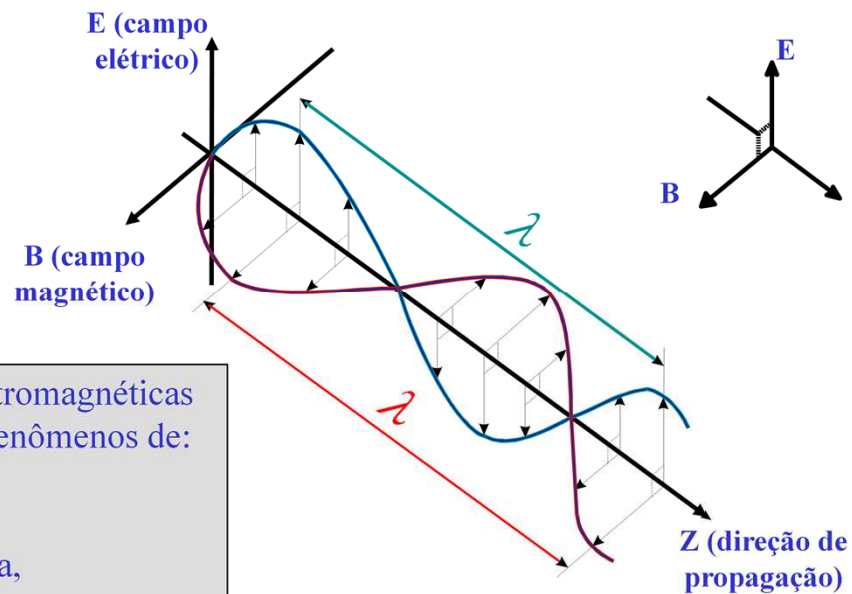
Por isso, a propagação do distúrbio eletromagnético é denominado de onda eletromagnética.

Onda Eletromagnética

- Como é impossível separar a existência dos campos elétrico e magnético, pois ambos são causados por cargas em movimento, devemos tratar da propagação de ondas, chamando-as “**eletromagnéticas**”, pois o campo elétrico e o campo magnético caminham juntas no espaço.

- A propagação da onda eletromagnética se dá de uma forma tal que a direção de propagação do vetor campo elétrico seja sempre perpendicular à do campo magnético.

Propagação da Onda Eletromagnética



As ondas eletromagnéticas apresentam fenômenos de:

- reflexão,
- refração,
- interferência,
- difração e
- espalhamento.

A restrição imposta pela onda eletromagnética é que os campos elétricos e magnéticos sejam perpendiculares, mas isso não define quem é paralelo em relação a Terra. Isso é definido como “polarização” da onda eletromagnética e assume-se a polarização como posição do campo elétrico em relação à superfície da Terra. Assim, uma onda polarizada verticalmente tem seu campo elétrico vertical à superfície, o mesmo ocorrendo com a onda polarizada horizontalmente.

Velocidade de Propagação da Onda Eletromagnética

Matematicamente, Maxwell previu que essa onda se propagaria no vácuo com uma velocidade c dada por:

$$c = \sqrt{\frac{1}{\epsilon_0 \mu_0}}$$

Onde:

- μ_0 (permeabilidade magnética do vácuo) igual a $4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$
- ϵ_0 (permissividade elétrica do vácuo) igual a $8,85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$.

A partir desses valores, obtemos: $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$, que é justamente a velocidade de propagação da luz no vácuo.

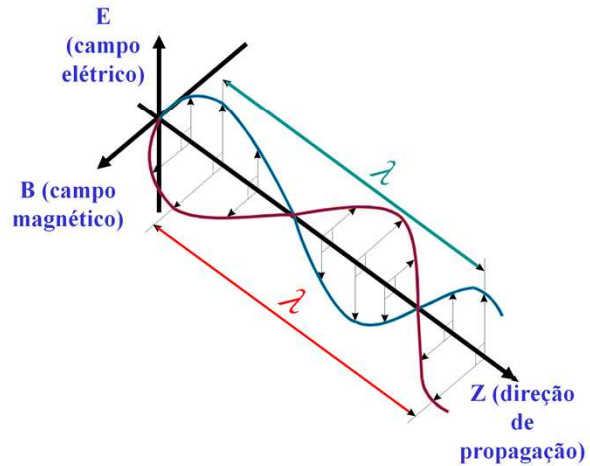
O que comprova que a luz é uma onda eletromagnética.

Comprimento da Onda (λ) de uma Onda Eletromagnética

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

f = frequência ; λ = comprimento de onda
 c = velocidade da luz no vácuo ($3 \times 10^8 \text{m/s}$)

O comprimento de onda é definido como: “**distância percorrida pela onda eletromagnética onde o valor instantâneo do campo elétrico ou do campo magnético volte a se repetir.**”



O Espectro Eletromagnético

• O conjunto de todas as ondas eletromagnéticas, distribuídas em função da sua frequência, é denominado *espectro eletromagnético*.

➤ A seguir temos uma representação do espectro eletromagnético, onde também estão relacionados as faixas de frequências com seus respectivos nomes usuais.

Espectro Eletromagnético	faixa de frequência	Designação Técnica	Designação – Leiga	Exemplos de Utilização
	<ul style="list-style-type: none"> → ELF – Extremely Low Frequency → VLF – Very Low Frequency → LF – Low Frequency → MF – Medium Frequency → HF – High Frequency → VHF – Very High Frequency → UHF – Ultra High Frequency → SHF – Super High Frequency → EHF – Extremely High Frequency 	300 Hz a 3000 Hz	ELF	
	3 KHz a 30 KHz	VLF	Ondas Muito Longas	
	30 KHz a 300 KHz	LF	Ondas Longas	Auxílio à navegação aérea, serviços marítimos, radiodifusão local
	300 KHz a 3000 KHz	MF	Ondas Médias	
	3 MHz a 30 MHz	HF	Ondas Tropicais Ondas Curtas	Radiodifusão local e distante, serviços marítimos (Estações Costeiras)
	30 MHz a 300 MHz	VHF		
	300 MHz a 3000 MHz	UHF		Transmissão de Tv, sistemas comerciais e particulares de comunicação, serviços de segurança pública (polícia, bombeiros etc)
	3 GHz a 30 GHz	SHF		
	30 GHz a 300 GHz	EHF	Microondas	Comunicação pública a longa distância: sistemas interurbanos e internacional em radiovisibilidade, tropodifusão e satélite

Algumas formas de comunicação e suas respectivas faixas de frequência.

Tipo de Comunicação	Faixa de Frequência
Rádio Amador	1,80 – 1,85 KHz
	7,00 – 7,30 KHz
	14,0 – 14,35 KHz (por satélite)
	24,0 – 24,5 GHz (por satélite)
Radiodifusão AM	540 – 1590 KHz
Radiodifusão FM	88,0 – 108 MHz
Radiodifusão TV	54,0 – 88,0 MHz (VHF baixo)
	174 – 216 MHz (VHF alto)
	470 – 800 MHz (UHF)
Sistemas de TV a cabo (transmissão em meio confinado (cabo))	54,0 – 88,0 MHz (VHF baixo)
	120 – 174 MHz (Mid Band)
	174 – 216 MHz (VHF alto)
	216 – 456 MHz (Super – Band)
470 – 800 MHz (UHF)	
MMDS – sistema de TV por assinatura multiponto	2500 – 2680 MHz
Satélites banda C e C estendida	3,625 – 4,2 GHz (UPLINK)
	5,850 – 6,425 GHz (DOWNLINK)
	7,315 – 7,375 GHz (UPLINK)
	7,965 – 8,025 GHz (DOWNLINK)
Satélites banda Ku e Ku estendida	11,7 – 12,2 GHz (UPLINK)
	14,0 – 14,5 GHz (DOWNLINK)
	10,95 – 11,2 GHz (UPLINK)
	13,75 – 14,0 GHz (DOWNLINK)
Telefonia celular banda A	824 – 835 MHz (UPLINK)
	845 – 846,5 MHz (UPLINK)
	869 – 880 MHz (DOWNLINK)
	890 – 891,5 MHz (DOWNLINK)
Telefonia celular banda B	835 – 845 MHz (UPLINK)
	846,5 – 849 MHz (UPLINK)
	880 – 890 MHz (DOWNLINK)
	891,5 – 894 MHz (DOWNLINK)

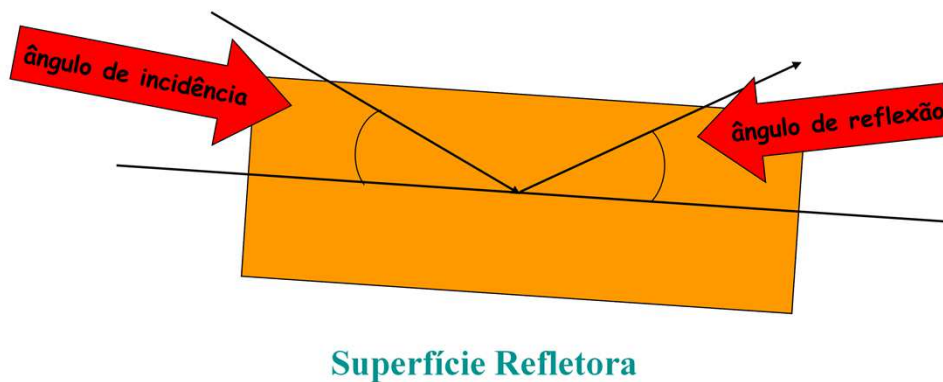
Propagação de Ondas

Através de equações propostas por Maxwell foi possível comprovar que a propagação da onda eletromagnético ocorre de forma ondulatório, sofrendo:

- reflexões
- refrações
- difrações
- ruídos e interferências

Reflexão

Uma onda de rádio é refletida quando encontra uma superfície com boa condutividade elétrica, da mesma maneira que um raio de luz é refletido por um espelho. O campo magnético é simplesmente refletido com a mesma fase em que incidiu, porém o campo elétrico sofre uma inversão de fase. Os ângulos de incidência e reflexão são iguais.

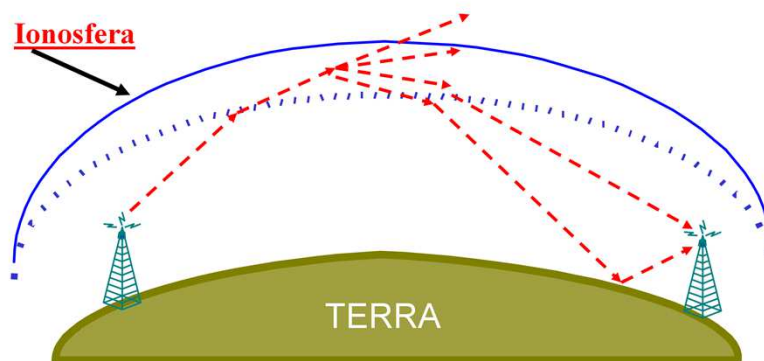


Reflexão: Modificação da direção de propagação de uma onda que incide sobre uma interface que separa dois meios diferentes, e retorna para o meio inicial.

Refração

Modificação da forma ou da direção de uma onda que passando através de uma interface que separa dois meios, tem em cada um deles diferente velocidade de propagação.

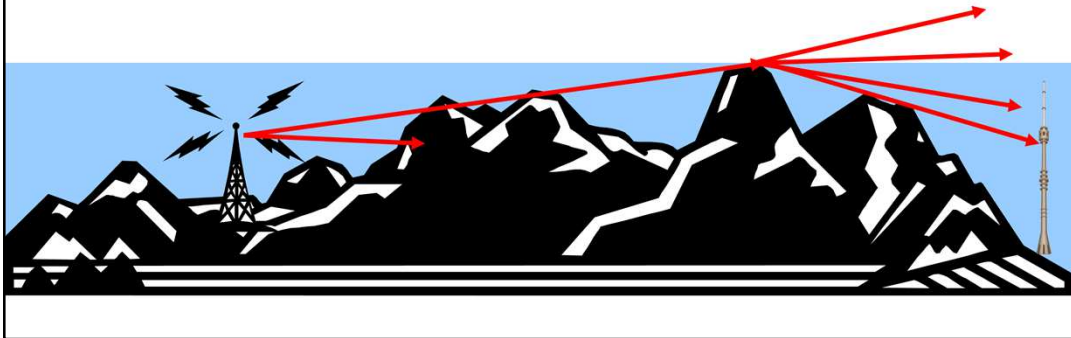
Por exemplo: Refração Ionosférica, normalmente na faixa de frequência HF (3 A 30 MHz)



Refração: Modificação da forma ou da direção de uma onda que passando através de uma interface que separa dois meios, tem em cada um deles diferente velocidade de propagação.

Difração

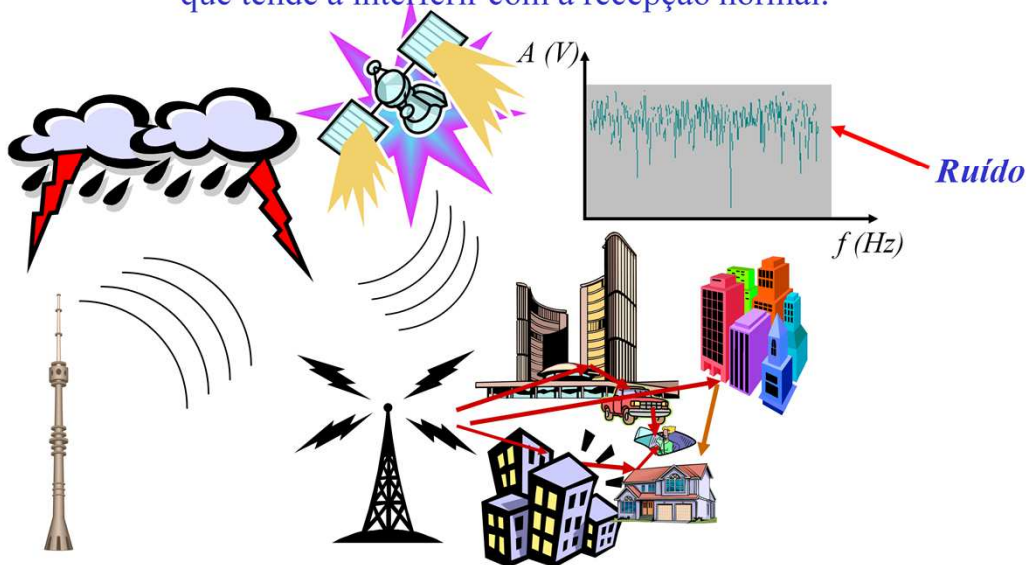
- Fenômeno que ocorre quando uma onda caminhante é limitada, em seu avanço por um objeto opaco que deixa passar apenas uma fração da frente de onda.
- Obstáculos na linha de visada entre duas antenas podem impedir a passagem do sinal de rádio, ou desviar o mesmo funcionando como se fosse uma antena.



Obstáculos no caminho de propagação entre duas antenas muitas vezes impedem a passagem da onda de rádio, exceto em casos de certos materiais que permitem a transmissão. Porém quando as ondas tangenciam obstáculos como morros, podem ser desviadas e espalhadas. Esta propriedade é chamada de difração, ou seja, a difração é um fenômeno que ocorre quando uma onda caminhante é limitada, em seu avanço por um objeto opaco que deixa passar apenas uma fração da frente de onda, e que pode ser observado como uma propagação da onda para regiões além do objeto e situada a sombra deste em relação à direção da onda incidente, ou como a propagação da onda em direções preferenciais.

Ruído e Interferência

São sinais espúrios e interferentes gerados ou não pelo sistema de telecomunicações, que se somam ao sinal original deformando-o e que tende a interferir com a recepção normal.



Ruídos e Interferências : São sinais espúrios e interferentes gerados ou não pelo sistema de telecomunicações, que se somam ao sinal original deformando-o que tende a interferir com a recepção normal. Estão sempre presentes em sistemas de comunicação, mas sobre condições normais de operação eles não são notados porque o nível do sinal é muito maior que o nível do ruído.

Os meios de transmissão estão sujeitos a diversos tipos de ruído com diversas origens. Designamos por ruído todos os sinais presentes que não transportam informação útil.

O ruído vai afetar de modo decisivo a recepção dos sinais já que o receptor deve ter a capacidade de distinguir o sinal útil e filtrar todos os outros.

Quando o ruído possui características físicas semelhantes ao sinal a filtragem é complexa e geralmente o sinal aparece ligeiramente distorcido o que pode provocar erros na interpretação da informação que está a ser transmitida.

O planeta Terra é um dos únicos planetas (?) que possui ruído eletromagnético artificial – criado pelos homens.

DESVANECIMENTO (Fading)

E as condições atmosféricas e de relevo influenciam a propagação dos feixes de microondas, particularmente em radioenlace digital.

Essas alterações, percebidas por atenuações, reforços e distorções no espectro do sinal, é o que chamamos de desvanecimento.

Mais a frente falaremos sobre os tipos de desvanecimentos

Denomina-se desvanecimento (fading) o fenômeno que produz variações aleatórias na intensidade do sinal recebido ao longo do tempo.

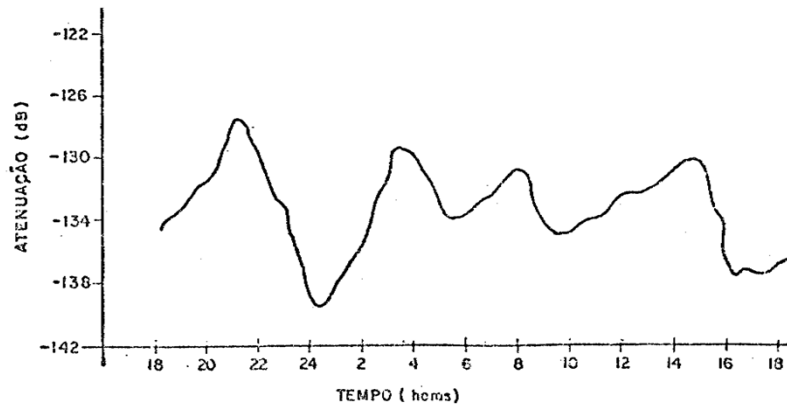
As variações a que estão sujeitos os sinais recebidos são devidas à instabilidade das condições atmosféricas.

O tempo calmo e quente (meses de verão) favorece o aparecimento de desvanecimentos intensos. Em televisão a longa distância, pode-se perceber que a imagem desaparece, restando o som; ou o som desaparece, ficando uma imagem fraca. Isto significa que o desvanecimento pode ser seletivo, isto é, pode afetar algumas frequências mais que outras, podendo bloquear completamente uma faixa ampla de frequências. Depois de uma tempestade, ou pouco antes dela, quando a atmosfera sofre uma desarrumação completa, as trajetórias múltiplas são muito afetadas e a probabilidade do raio direto chegar sem interferências na recepção é bem maior. Na recepção de televisão a distância, depois de uma chuva forte, a imagem chega com excelente qualidade e definição.

Uma comunicação que se estabeleça por cima de uma superfície líquida sujeita à influência das marés, sofre duplamente, pelo fato do sinal ser dependente de dois fatores importantíssimos: a variação do nível das águas, dando origem a ângulos de incidência diferentes e comprimentos de trajeteto refletidos diferentes, bem como uma variação diária do índice de refração, provocada pela evaporação das águas logo após o nascer do sol e uma outra variação logo após o pôr do sol. Exemplo desse fenômeno é apresentado na figura a seguir, em que mostra a ocorrência desse fato entre duas cidades na orla marítima (Cabo Frio e Rio de Janeiro – distância 100 km sobre o mar), na frequência de 390 MHz.

Desvanecimento (Fading)

Ocorrência de desvanecimento entre duas cidades na orla marítima (Cabo Frio e Rio de Janeiro – distância 100 km sobre o mar), na frequência de 390 MHz.



Propagação de Ondas Eletromagnéticas

A propagação de ondas eletromagnéticas em torno da terra é influenciada pelas propriedades do solo e da atmosfera.

- A Terra é um corpo não homogêneo cujas propriedades eletromagnéticas variam consideravelmente de um ponto para o outro.
- A água do mar é altamente condutora.
- As areias dos desertos são dielétricos.
- A ionosfera comporta-se como um meio altamente condutor numa grande faixa de frequências.

Os fatores acima mencionados, se por um lado tornam possíveis as comunicações a longas distâncias, por outro lado são responsáveis por fenômenos de interferência.

A propagação de ondas eletromagnéticas em torno da terra é influenciada pelas propriedades do solo e da atmosfera.

A Terra é um corpo não homogêneo cujas propriedades eletromagnéticas variam consideravelmente de um ponto para o outro. A água do mar é altamente condutora e as areias dos desertos são dielétricos, apresentando condutividade quase nula e dissipando energia.

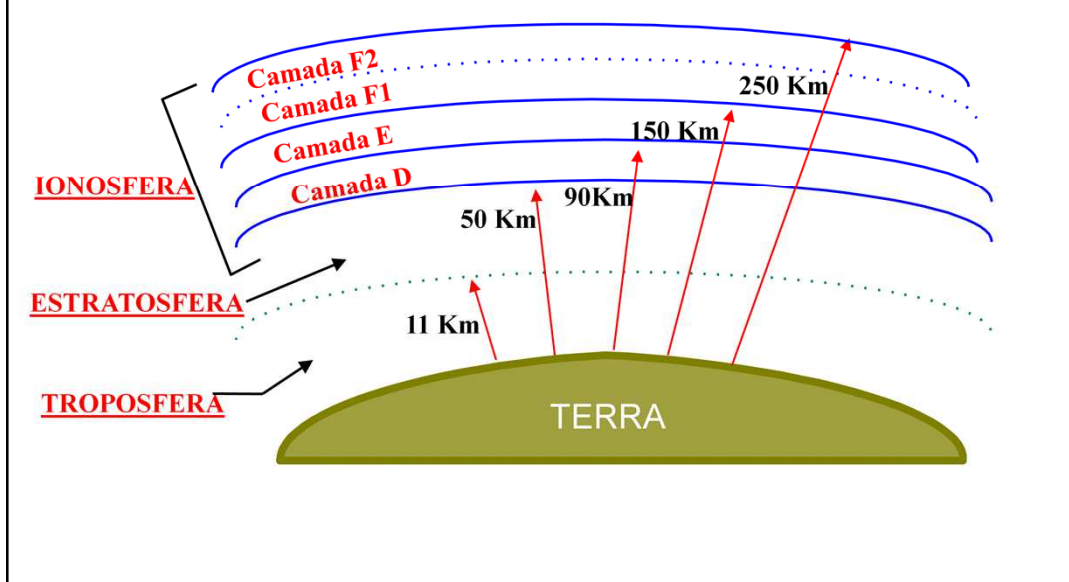
Tipos de Propagação

Em função da frequência a ser transmitida pode-se dividir os tipos de propagação em:

- Ondas Terrestres
 - Ondas Espaciais
 - Ondas diretas
 - Ondas refletidas
 - Ondas de Superfície
- Ondas Troposférica
- Ondas Ionosféricas

A energia irradiada por uma antena transmissora pode alcançar a antena receptora por vários trajetos, como já mencionado, reflexão, difração, refração, espalhamento, etc. Em função das faixas de frequência pode-se dividir a propagação em vários tipos conforme a utilização.

Composição da Atmosfera



A atmosfera que envolve a terra é um meio dinâmico e suas propriedades variam com a temperatura e com a umidade. Na atmosfera superior aparecem regiões com elevado grau de ionização e, por conseguinte, elevado número de elétrons livres.

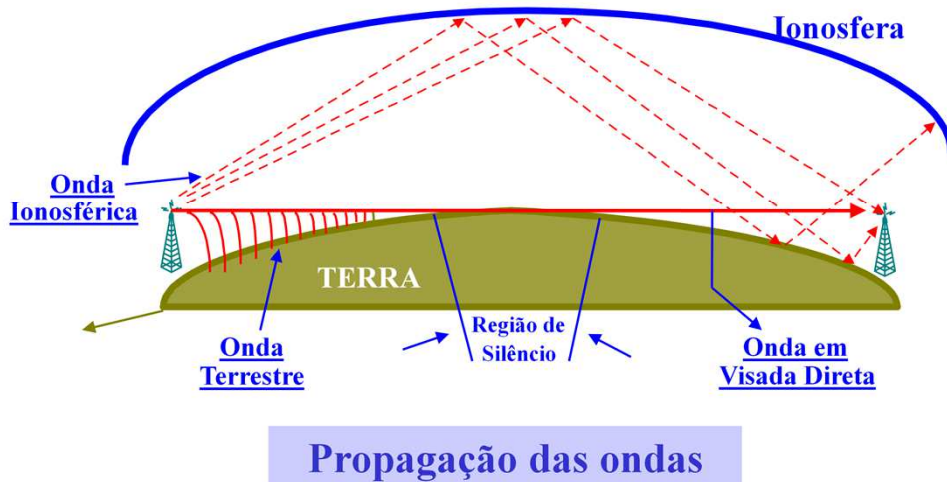
A ionosfera comporta-se como um meio altamente condutor numa grande faixa de frequências nas quais as ondas que a atingem são refletidas e retornam a superfície terrestre. Suas propriedades são fortemente influenciadas pelo sol, sofrendo variações diurnas e com as estações do ano. A influência da atividade solar nas propriedades da ionosfera pode ser notada pelas mudanças causadas às características de propagação das ondas de rádio.

A ionosfera é um meio turbulento. Apresenta anomalias nos fenômenos de espalhamento, e sofre influência do campo magnético terrestre.

A radiodifusão comercial de ondas curtas é um exemplo típico de comunicação por onda ionosférica e pode-se observar que no período noturno há uma facilidade maior para a sintonia dessa faixa. Ocorre que à noite a camada ionosférica desaparece e as camadas F1 e F2 combinam-se, dando origem à camada F, o que altera profundamente a composição da ionosfera e o mecanismo de propagação.

Os fatores acima mencionados, se por um lado tornam possíveis as comunicações a longas distâncias, por outro lado são responsáveis por fenômenos de interferência.

Alguns Tipos de Propagação



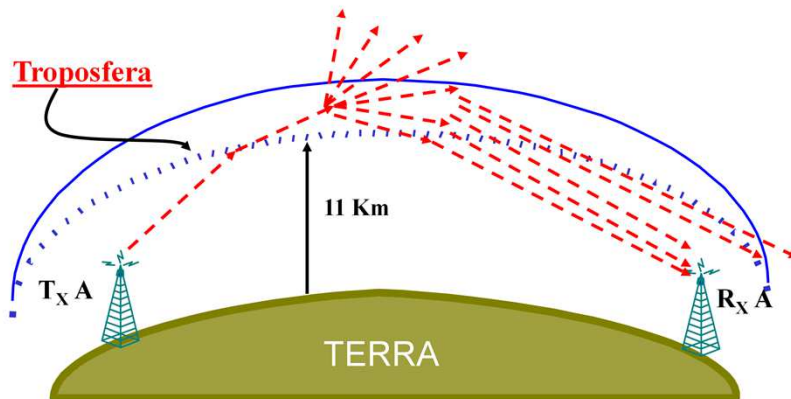
Acima de 30 MHz, as ondas terrestres são totalmente ineficientes e as ondas ionosféricas já tiveram sua frequência crítica superada. Assim, o tipo de propagação para essa faixa é o da **visada direta**, onde antena transmissora e antena receptora devem se encontrar na mesma linha, sem obstáculos se interpondo entre elas.

Na verdade só é usado em transmissões de microondas, onde a confiabilidade deve ser o ponto alto do sistema. Já a radiodifusão FM e a transmissão de sinais de televisão, que também se encontram nesta faixa, aproveitam os fenômenos da reflexão e da difração da onda transmitida em obstáculos, para realizar a recepção.

As comunicações via satélite é uma aplicação da transmissão em visada direta.

Ondas Troposféricas

A estação A equipada com um transmissor de alta potência (1 kW) irradia no interior de um cone estreito uma densidade de potência elevada. Esta energia ao incidir na Troposfera, é espalhada em várias direções, sendo que a estação B recebe parte da mesma, segundo o feixe de recepção da antena dessa estação

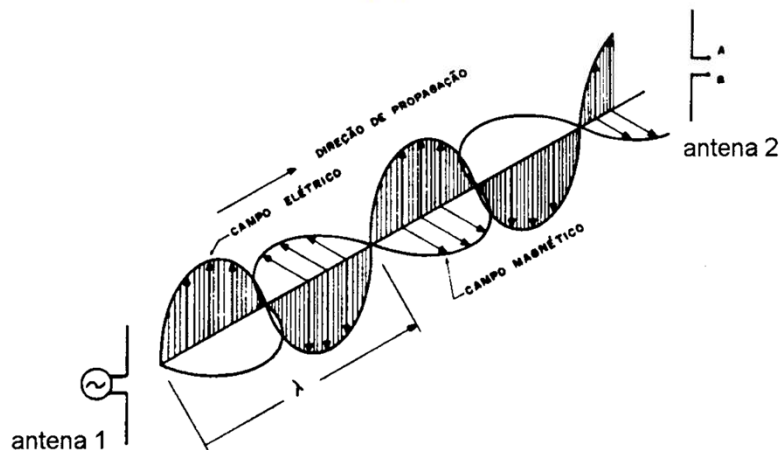


As ondas que são refratadas devido às variações bruscas na constante dielétrica da troposfera (região da atmosfera até aproximadamente a altura de 11 km da superfície terrestre) são denominadas ondas troposféricas.

A propagação por ondas troposféricas é útil para distâncias de várias centenas de quilômetros em frequências nas faixas de VHF e UHF. Neste tipo, as ondas são espalhadas devido a não homogeneidade da constante dielétrica e, portanto, pela variação do índice de refração da troposfera com a altitude.

Antenas

➤ As antenas são dispositivos eletrônicos formados por condutores, geralmente na forma de hastes, que são responsáveis pelo acoplamento e distribuição da energia no espaço, constituindo-se nos elementos terminais dos equipamentos de transmissão

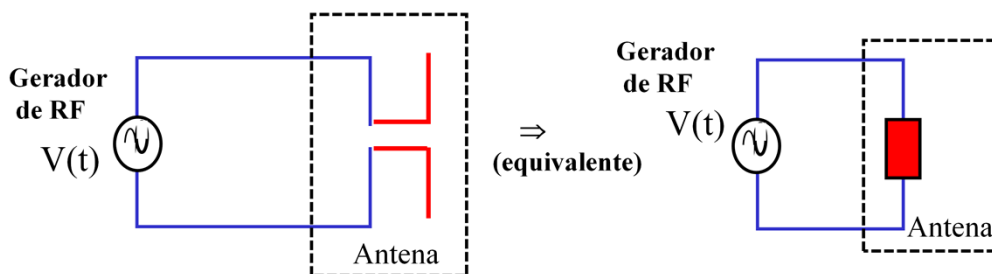


A figura acima esquematiza um circuito de transmissão e recepção através de antenas. A antena (1) está ligada a um gerador de alta frequência (gerador de rádio frequência), sendo portanto submetida a uma variação de tensão nos seus terminais. Em função desta variação de tensão, os elétrons existentes na antena (1) passam a vibrar com a mesma frequência do gerador, formando uma corrente elétrica alternada. Por sua vez, a corrente elétrica gera um campo magnético variável ao redor da antena o qual, produz um campo elétrico que induz outro campo magnético e, assim, sucessivamente. Ocorre, portanto, a formação de um distúrbio eletromagnético.

Como foi visto anteriormente, a propagação deste distúrbio eletromagnético se dá na forma de uma onda eletromagnética. Esta onda ao se propagar irá atingir a antena (2). Devido a presença dos campos variáveis da onda a antena (2), apresentará uma tensão induzida nos seus terminais com a mesma frequência da onda eletromagnética. Desta forma a antena (2) capta parte do sinal irradiado pela antena (1).

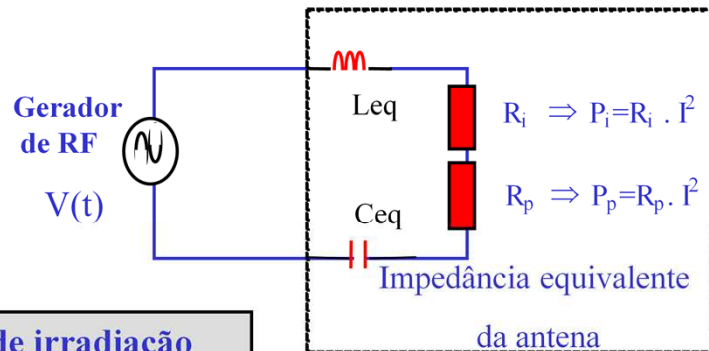
Circuito equivalente da antena

- Em um circuito de transmissão a antena é vista como uma carga que esta ligada a um gerador de radiofrequência.
- A antena representa uma impedância para o circuito de transmissão (Tx).



A impedância da antena não é uma impedância real (como no caso de um resistor ou capacitor), mas na verdade corresponde a uma impedância que, se fosse colocada no lugar da antena, consumiria a mesma potência. Referimo-nos a este valor de impedância como sendo a **impedância equivalente da antena**.

Circuito equivalente da antena



R_i - resistência de irradiação
 R_p - resistência de perdas
 L_{eq} - indutância equivalente,
 C_{eq} - capacitância equivalente

Na figura acima apresenta-se o esquema da impedância equivalente da antena que é composta pelos seguintes elementos:

R_i - resistência de irradiação, é definida de tal modo que $R_i \cdot I^2$ corresponda à potência irradiada pela antena.

R_p - resistência de perdas, está associada a perdas por efeito joule ($R_p \cdot I^2$) nos condutores da antena.

L_{eq} - indutância equivalente, representa os efeitos de auto indução na antena (efeitos provocados pela formação do campo magnético variável).

C_{eq} - capacitância equivalente, representa os efeitos capacitivos da antena.

Princípio da Reciprocidade

➤ **O princípio da reciprocidade afirma que todas as propriedades e características observadas para uma antena operando como transmissora são idênticas as observadas quando a mesma antena opera como receptora.**

➤ **Tanto na Transmissão como na Recepção o circuito equivalente da antena apresenta uma impedância**

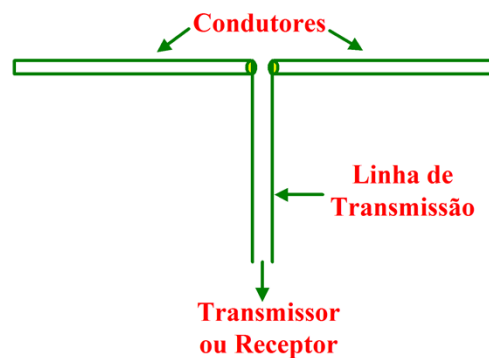
O princípio da reciprocidade afirma que todas as propriedades e características observadas para uma antena operando como transmissora são idênticas as observadas quando a mesma antena opera como receptora.

Por exemplo, na página anterior vimos que tanto na Tx como na Rx o circuito equivalente da antena apresenta uma impedância, baseados no princípio da reciprocidade podemos afirmar que a impedância de uma antena funcionando como Tx será a mesma que ela apresentará quando funcionar como Rx.

Antenas

- Uma ANTENA é um dispositivo capaz de irradiar ou captar ondas eletromagnéticas

- Sua aparência física é basicamente composta por condutores alimentados por uma linha de transmissão



É o elemento final de um sistema de transmissão, que tem a função de mandar para o espaço ou receber os sinais gerados por um transmissor. Ex.: Rádio. Esses sinais mandados para o espaço serão captados por outras antenas com as mesmas características de uma antena que os emitiu.

Ex.: Ao colocarmos dois violões de costas um para o outro, com a mesma afinação e tocarmos uma de suas cordas veremos que a mesma corda do outro violão também vibrará. O fenômeno ocorre porque os dois instrumentos foram construídos e afinados para vibrarem na mesma frequência.

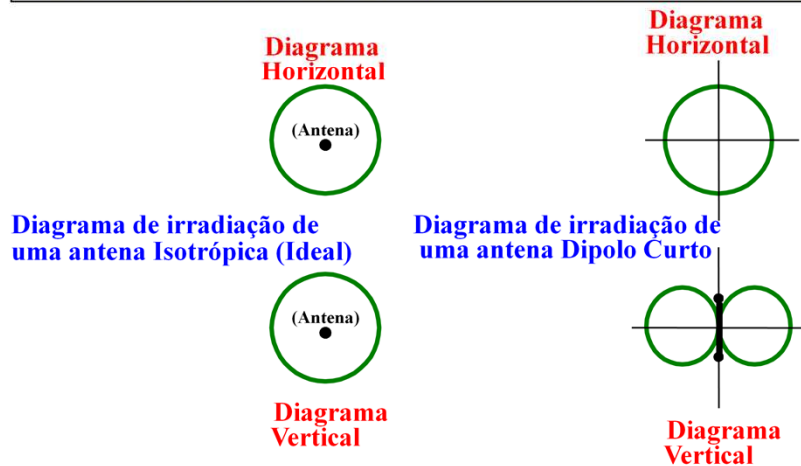
As dimensões físicas de uma antena são normalmente da ordem de grandeza do comprimento de onda associado à frequência do sinal a ser transmitido ou captado.

Características das Antenas:

- a) Diagrama de Irradiação**
- b) Ângulo de Abertura ou Largura de Feixe**
- c) Rendimento**
- d) Diretividade**
- e) Ganho**
- f) Relação Frente-Costas**
- g) Resistência de irradiação**
- h) largura de Faixa**
- i) Potência Recebida**
- j) Impedância**

a) **Diagrama de Irradiação:** é a representação em coordenadas polares da intensidade de campo irradiada ou recebida por uma antena para todas as direções do espaço

A antena chamada **isotrópica**, ou puntual, é a antena ideal (e portanto não existe) usada como padrão para a definição de outras características, que irradia igualmente para todas as direções.



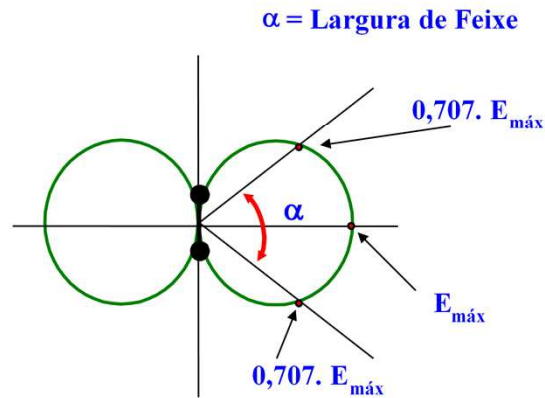
Os diagramas de irradiação são gráficos onde são marcados pontos correspondentes as intensidades de irradiação nas diferentes direções de propagação. Um diagrama de irradiação completo é obtido levantando a intensidade de potência irradiada numa superfície esférica que envolve a fonte irradiadora. Normalmente, ao invés do diagrama completo são levantados dois diagramas de irradiação: um no plano horizontal e outro no plano vertical.

A antena chamada **isotrópica**, ou puntual, é a antena ideal (e portanto não existe) usada como padrão para a definição de outras características, que irradia igualmente para todas as direções.

Desta forma, se formos compor um gráfico espacial para a intensidade do campo em função da direção, este será uma esfera. E se cortar esta esfera em dois planos Horizontal e vertical gera-se o diagrama de irradiação horizontal e vertical, mostrados na figura acima.

No caso mais habitual, de uma dipolo curto, o sólido que representa sua irradiação deixa de ser uma esfera e aproxima-se mais a forma de um “biscoito”. Os cortes dos planos horizontal e vertical são mostrados nas figuras acima.

b) **Ângulo de Abertura ou Largura do feixe:** Largura de feixe de uma antena é definida como o ângulo formado pelas linhas radiais que cortam o lóbulo principal nos pontos correspondentes a metade da potência irradiada na direção do máximo ou o quando campo máximo cai de 0,707 do seu valor (ou seja: -3 dB)



- Se a antena irradia igualmente em todos os sentidos de um plano , então sua largura de feixe nesse plano é de 360° .

A largura de feixe indica a região angular onde a irradiação de potência é maior. Isto é, a largura de feixe é um parâmetro que representa a capacidade da antena de concentrar a potência irradiada na direção do máximo de irradiação. Quanto menor o valor da largura de feixe maior a capacidade da antena em concentrar a potência e vice-versa.

c) **Rendimento:** é a relação entre a potência realmente irradiada por uma antena e a potência a ela entregue pelo transmissor, definida como:

$$\eta = \frac{P_{IRRADIADA}}{P_{RECEBIDA}}$$

ou

$$\eta = \frac{R_{irradiação}}{R_{irradiação} + R_{perdas}}$$

d) **Diretividade:** é a relação entre o campo irradiado (E) pela antena em uma determinada direção e o campo que seria irradiado por uma antena isotrópica ($E_{isotrópica}$) que recebesse a mesma potência, é definida como:

$$D = 20 \log \frac{E}{E_{isotrópica}}$$

A diretividade de uma antena é definida como a relação entre a potência transmitida na direção do máximo do diagrama de irradiação, considerando-se a antena sem perdas, e a que seria irradiada por uma antena isotrópica, também sem perdas, em uma direção qualquer, supondo-se que ambas irradiem a mesma potência total.

Observe que a diretividade mede a potência apenas na direção do máximo de irradiação, ou seja, preocupa-se somente com o valor de potência que é maior (para a direção preferencial da antena). As potências irradiadas para outras direções não interessam.

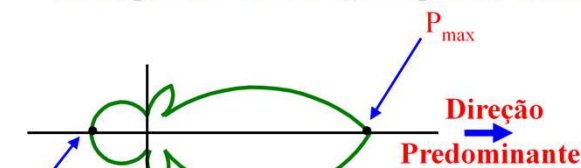
A diretividade expressa quanto a mais, uma antena não isotrópica, consegue irradiar em relação a uma antena isotrópica, ou seja, a diretividade indica a capacidade da antena em concentrar a potência irradiada em uma direção preferencial.

O cálculo da diretividade é teórico, pois não leva em consideração as perdas da antena.

e) **Ganho:** é o resultado do produto da rendimento pela diretividade, ou seja:

$$G = \eta \cdot D$$

f) **Relação Frente-Costas:** é a relação entre a potência irradiada em uma direção predominante e aquela irradiada no mesmo eixo, porém em direção oposta, definida como:



$$RFC = 10 \cdot \log \frac{P_{\max}}{P_c}$$

A Relação Frente-Costas normalmente é expressa em dB.

Ganho:

O ganho de uma antena tem a mesma interpretação física que a diretividade, porém as perdas da antena são agora consideradas. Assim, o ganho de uma antena é simplesmente o produto da diretividade pela seu rendimento.

O ganho indica a capacidade de uma antena em concentrar, na direção de interesse, a potência que seria irradiada em outras direções. Ele representa uma comparação entre uma antena não isotrópica e uma antena isotrópica.

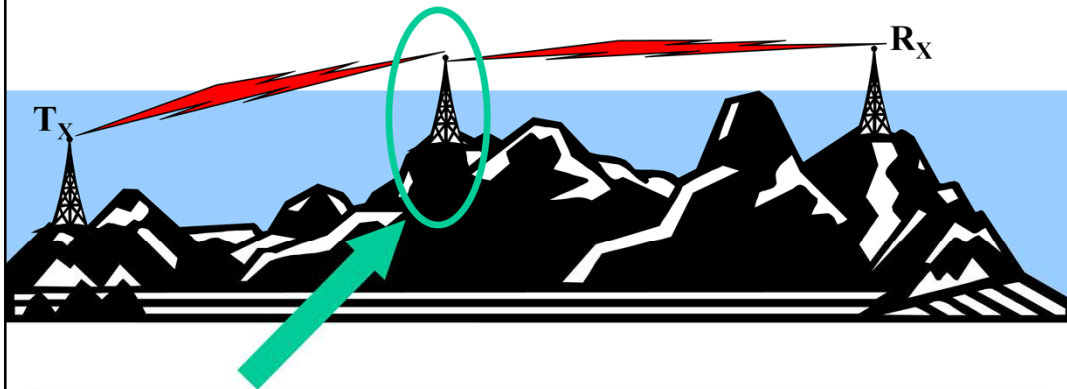
O ganho de uma antena **não** possui o mesmo significado que o ganho de um amplificador, pois ele não é a relação entre potência de saída e potência de entrada. A antena é um elemento passivo que apenas irradia a potência que lhe é fornecida. Portanto, independente do ganho ser 1,0 ou 1000, a potência irradiada pela antena é sempre menor (ou igual) àquela que lhe foi fornecida.

Relação Frente-Costas:

Em diversos casos a irradiação ou recepção de potência na direção oposta é indesejável, pois na transmissão provoca perda de eficiência e na recepção provoca interferências. Portanto, são fabricadas antenas que, em função de seus detalhes construtivos, apresentam uma forte atenuação da irradiação ou recepção na direção oposta a do lóbulo principal.

O parâmetro que indica esta capacidade de atenuação é a relação frente-costas. A relação frente-costas é definida como a relação entre as potências irradiadas (ou recebidas) na direção do lóbulo principal (P_{\max}) e na direção oposta a esse máximo (P_c) expressa em dB.

Exemplo da importância da RFC em Links
Microondas com repetidores:



Antenas de uma estação retransmissora. Estas antenas devem possuir RFC elevada para que não ocorra interferência entre elas.

Um exemplo da importância deste parâmetro são os "Links" terrestres da Embratel. Nestes sistemas é necessário a utilização de antenas que possuam elevada RFC, a fim de evitar que o sinal irradiado na direção oposta ao sentido de transmissão prejudique a comunicação.

g) **Resistência de irradiação:** a resistência de radiação é dada por uma parcela reativa e outra resistiva. Normalmente a resistência reativa é desprezada e assume-se a antena resistiva.

- A resistência de irradiação (R_i) é importante para que estabeleça-se um casamento de impedâncias da antena com a linha de transmissão e para se determinar a potência irradiada pela antena.

$$P_{IRRADIADA} = R_i \cdot \frac{I_p^2}{2}$$

Onde I_p é a corrente de pico ao longo da antena



h) Largura de Faixa (Banda Passante): é a faixa de frequências na qual a antena pode operar satisfatoriamente, sem alterar suas características mais importantes, como por exemplo a diretividade

i) Potência Recebida: uma antena transmissora com ganho G_T e uma receptora com ganho G_R , quando uma transmissora transmitir uma potência P_T , a receptora receberá uma potência P_R , dada por:

$$P_R = \frac{P_T \cdot G_T \cdot \lambda^2}{(4\pi d)^2}$$

Onde " λ " é o comprimento de onda do sinal transmitido e " d " é a distância entre as antenas

Largura de Faixa ou Banda Passante:

A antena comporta-se como um filtro passa faixa possuindo duas frequências de corte. O intervalo entre estas duas frequências, denominado faixa de passagem, é o intervalo no qual a antena é considerada operacional. Fora deste intervalo o nível de sinal decresce abaixo de valores aceitáveis (atinge valores inferiores a metade do nível máximo).

j) Impedância:

A impedância de uma antena depende das características construtivas da antena e da forma de alimentação.

➤ O conhecimento da impedância de entrada de uma antena é fundamental para garantirmos o casamento de impedância com a linha de alimentação da antena.

"Quando existe casamento de impedância não há onda refletida."

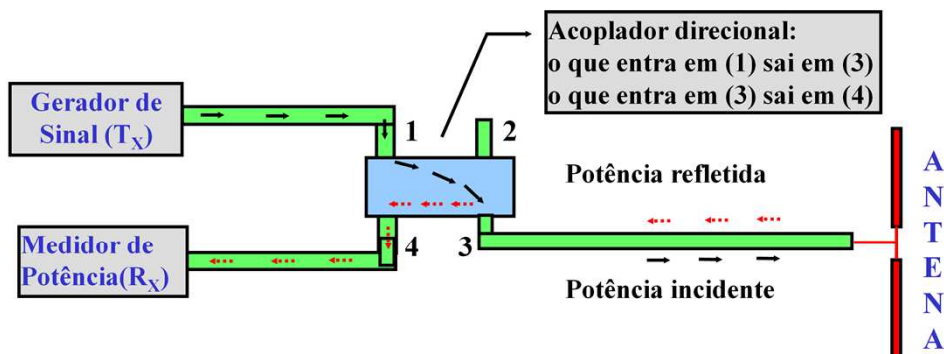
A impedância de uma antena depende das características construtivas da antena e da forma de alimentação.

O conhecimento da impedância de entrada de uma antena é fundamental para garantirmos o casamento de impedância com a linha de alimentação da antena.

OBS.: "Quando existe casamento de impedância não há onda refletida."

Dois circuitos estão casados quando a impedância de saída de um é igual a impedância de entrada do outro.

Exemplo de como medir a potência de retorno em uma ligação com antena:



A potência que retorna (reflete), em função do descasamento de impedância entre a linha e a antena, chega até o medidor através do acoplador direcional.

Na prática, não costuma-se calcular a impedância de uma antena. Ao invés disso, é medida apenas a **perda de retorno** decorrente do descasamento entre linha de alimentação e antena.

Permite-se normalmente uma perda de retorno máxima de 18 dB. Ou seja, o nível de sinal refletido devido ao descasamento tem que ser no mínimo 18 dB mais baixo que o sinal incidente.

Para medir-se a potência de retorno em uma ligação com antena procede-se da forma indicada na figura acima.

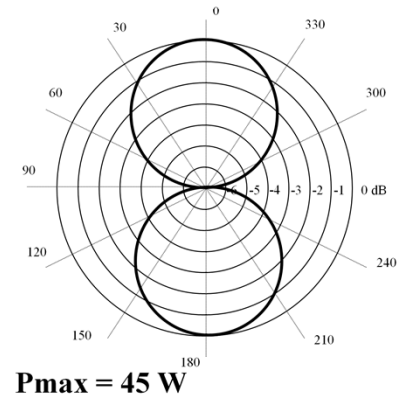
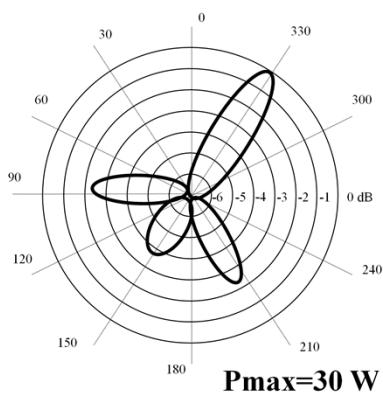
Acoplador Direcional



Exercício:

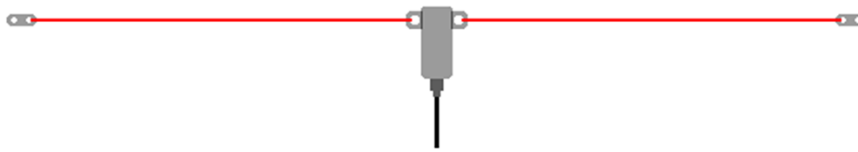
Dados os diagramas de irradiação e os valores de potência máxima correspondentes a cada um, determine:

- A relação frente-costas de cada diagrama.
- As potências em (W) nas direções correspondentes a ($0^\circ, 30^\circ, 90^\circ, 180^\circ$)
- A largura de feixe.



Tipos de Antenas

a) **Dipolo:** Existem vários tipos de antenas dipolos em função de sua classificação e trabalho. Mas basicamente é constituída por duas hastes condutoras, alimentadas pelo centro do que vem a ser a antena



Independente da faixa em que atua, o dipolo, conforme seu tamanho (comprimento elétrico L) é classificado como:

$L < \lambda/10$ - dipolo curto

$L = \lambda/4$ - dipolo de quarto de onda

$L = \lambda/2$ - dipolo de meia onda

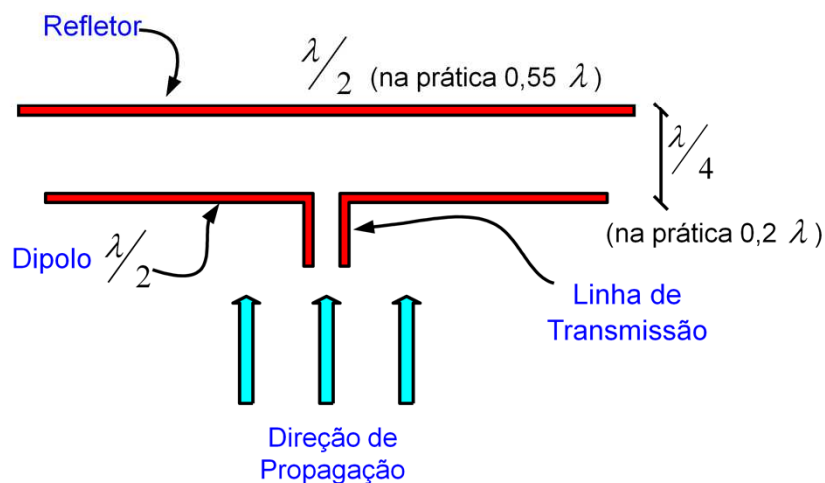
$L = \lambda$ - dipolo de onda completa

Este é o tipo de antena mais elementar. A antena dipolo é constituída por duas hastes condutoras disposta sobre uma linha reta. A antena dipolo é empregada em todas as faixas de frequência, logicamente o seu tamanho deve ser adequado a frequência em que irá operar.

Nas faixas de VLF, LF e MF este tipo de antena só é empregado quando não é possível a instalação de antenas tipo torre (antenas tipo monopolo). Em HF o emprego de dipolos já é mais comum, sendo estes construídos a partir de fios suspensos por torres. Porém, o dipolo predomina nas faixas de VHF e UHF, onde pode ser utilizada como antena (antenas internas de TV, por exemplo) ou como elemento ativo de outros tipos de antenas. A razão para a sua maior utilização nas faixas de VHF e UHF ocorre devido ao menor comprimento de onda existente nestas faixas de frequência, o que possibilita a construção de antenas com dimensões reduzidas. Outra utilização do dipolo ocorre em sistemas de microondas, onde o dipolo é empregado como parte integrante dos iluminadores das antenas parabólicas.

Antena Dipolo com elementos parasitas

A colocação de um condutor, um pouco maior que o dipolo, do lado oposto ao do recebimento do sinal, a uma distância de $\lambda/4$, aumenta a potência recebida pela antena.



O mecanismo que provoca o aumento da potência é a reflexão do sinal recebido. Podemos descrever a reflexão do sinal no refletor pelos seguintes passos:

- 1) Parte do sinal enviado por uma antena transmissora chega ao dipolo e é captado;
- 2) Uma segunda parcela do sinal que chega na antena não é captado, passando direto pelo dipolo e atingindo o refletor. Este sinal está defasado de 90° em relação ao sinal captado pelo dipolo, pois percorre uma distância igual a $\lambda/4$.
- 3) Ao atingir o refletor o sinal é refletido de volta para o dipolo. No processo de reflexão ocorre uma inversão na fase do sinal.
- 4) O sinal refletido chega ao dipolo, após percorrer novamente a distância de $\lambda/4$, em fase com o sinal incidente (sinal que foi captado diretamente pelo dipolo), aumentando a potência do sinal recebido.

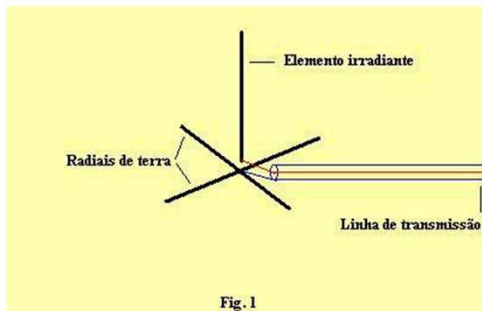
Por outro lado, os sinais que chegam no dipolo pela suas costas, sofrem uma forte atenuação, pois uma grande parcela do sinal é refletida no refletor.

Características da dipolo são alteradas, como:

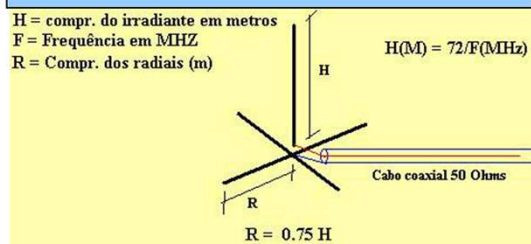
- Impedância: Diminui devido ao aumento da corrente no dipolo.
- Diagrama de irradiação: O lóbulo principal é alongado e o lóbulo oposto ao principal diminui.
- Relação Frente Costas: Aumenta.
- Diretividade e ganho: Aumentam.
- Largura de faixa: Diminui, pois para que o sinal refletido fique em fase com o sinal incidente é necessário que a distância entre dipolo e refletor seja de $\lambda/4$.

Outra forma de utilizar um elemento parasita é colocando-o na "frente do dipolo" (na direção de recepção do sinal), neste caso a distância que separa o condutor parasita do dipolo é cerca de $\lambda/8$ e o comprimento do parasita é menor que o do dipolo. Este tipo de condutor parasita é chamado de diretor e seu uso fornece um resultado semelhante ao obtido com o refletor. Em geral são utilizados vários diretores, sendo suas distâncias em relação ao dipolo e os seus tamanhos determinados a partir do comprimento de onda.

b) **Antena Marconi**: esse tipo de antena, também chamado de “**monopolo**”, nada mais é que uma dipolo onde uma das varetas foi aterrada, onde a terra se comporta como condutor. Desta forma a haste vertical passa a ter sua imagem refletida no solo e o monopolo passa a se comportar como dipolo.



Como calcular uma antena vertical de 1/4 de onda:



A antena tipo monopolo é constituída por uma haste metálica vertical, colocada acima de um plano refletor, muitas vezes chamado plano terra.

A estrutura da antena é geralmente uma torre metálica. A seção transversal da torre tem influência sobre a impedância nos terminais da antena e sobre a faixa de frequência em que ela opera. Quanto maior a estrutura maior a faixa de frequência, ao redor da frequência central, que a antena consegue operar (maior a banda passante). A seção pode ser aumentada, do ponto de vista elétrico, utilizando-se uma estrutura ao redor da antena composta de fios.

O plano refletor é uma superfície de material com boa condutividade. Em baixas frequências, VLF, LF, MF, o plano refletor é o próprio solo onde a antena esta colocada. Portanto, estas antenas são colocadas preferencialmente em terrenos úmidos ou em terrenos nos quais foram adicionadas substâncias que aumentam a condutividade do solo, tais como carvão e sais minerais.

Outro procedimento utilizado para aumentar a condutividade do solo, é a colocação de uma malha radial de fios condutores. Uma boa malha apresenta 120 radiais com afastamento angular de 3° e diâmetro igual a $\lambda/2$.

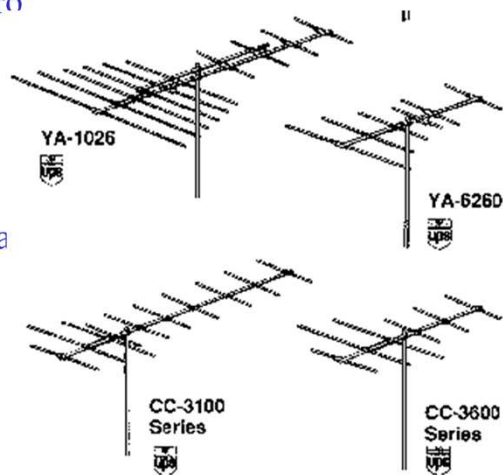
O plano refletor tem como objetivo gerar uma imagem elétrica da antena, transformando a antena monopolo em antena dipolo. Por exemplo a antena monopolo de $\lambda/4$ é transformada em uma antena dipolo de $\lambda/2$.

c) Antena Yagi:

➤ As antenas Yagi são constituídas de um dipolo excitador, um elemento refletor e um certo número de diretores.

➤ O número de diretores e as dimensões dos componentes das antenas Yagi são calculados em função dos valores desejados para a banda passante e para o ganho.

➤ As antenas Yagi são muito utilizadas nas faixas de frequência HF (3 - 30 MHz), VHF (30 - 300 MHz) e UHF (300 - 3000 MHz).



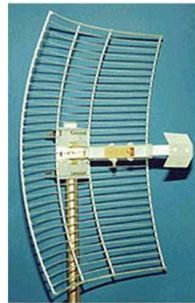
d) **Antenas Direcionais**: utiliza os elementos parasitas denominados refletores e diretores, cuja função específica é aumentar o ganho e a relação frente-costas, diminuindo a largura de feixe.



Antenas Direcionais Yagi para telefone celular rural



Antena Base Direcional
Configuração Yagi: Frequência:
1.8 a 2.0 GHz (Sistema VESPER)



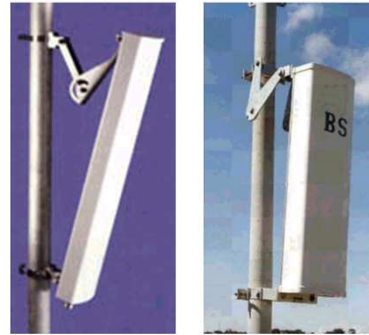
Para recepção de Internet
e link ponto a ponto.

e) **Antenas Omnidirecionais**: É aquela que irradia em todas as direções. Em geral uma antena transmissora ou receptora é formada por uma ou mais torres, que propagam ou captam no espaço as ondas para as quais estão ajustadas, sem entretanto ter condições de determinar a sua direção. Por exemplo: Estações Rádiofusas (Broadcasting)



Utilizada para multiponto de longo alcance na frequência de 2.4 GHz.

f) **Antenas Setorizadas:** antenas direcionais de alta relação frente-costas, com diferentes coberturas e ganhos, em versões de polarização vertical ou dupla polarização, com ajuste mecânico ou elétrico (tilt) em elevação.



g) **Antena Celular Móvel 3 dBi:** Antena utilizada em veículos automotivos ou em áreas onde o sinal de celular é fraco



As antenas setorizadas normalmente são usadas em Estações Rádio Base (ERB) em Sistemas de Comunicação Móvel Celular, e possuem normalmente largura de feixe de 120° que são dispostas 3 antenas para uma cobertura omnidirecional.

Para cada setor da ERB deve existir pelo menos duas antenas, uma transmissora e outra receptora, em alguns casos coloca-se duas receptoras e uma transmissora, onde usa-se a diversidade de espaço na recepção para minimizar os efeitos de multipercursos e conseqüentemente de interferência.

h) Antena Parabólica Vazada: Utilizada em transmissões na faixa de UHF.



i) Antena Parabólica: Utilizada em transmissões via satélite



j) Antenas de microondas de alta relação frente-costas: indicadas para a grande maioria dos enlaces, pois apresentam alta discriminação de níveis de irradiação traseira a partir de 100 graus, referenciados à direção de apontamento da antena



Antenas parabólicas são usadas em UHF e Microondas. Possuem uma alta diretividade o que nos leva a perceber que possuem um alto ganho. Uma antena receptora de satélites de 3 metros de diâmetro, por exemplo, tem um ganho de 33dB, ou seja, ela “amplifica” (o mais correto seria falar concentra) o sinal de chegada por volta de 2000 vezes.

Lembrando sempre que o ganho da antena parabólica é devido a sua capacidade de concentração, em um único ponto, do sinal recebido.

As antenas de microondas com alta Relação Frente Costa (RFC), são normalmente empregadas em enlaces de microondas, onde elas estão funcionando como repetidoras do sinal, ou seja existe uma antena para receber e outra para retransmitir o sinal, e neste caso, ambas estão na mesma torre. Para isso esta antenas devem possuir uma RFC alta para que não causem interferência uma na outra.

l) Antenas de Microondas de Alto

Desempenho: Antenas com blindagem, com elementos supressores de RF no seu interior e com radome. Indicadas para enlaces de grande congestionamento, pois apresentam alta discriminação de níveis de irradiação lateral e traseira.



m) Antenas Log-periódicas: São antenas constituídas por uma série de dipolos de dimensões diferentes. Cada dipolo atua numa determinada faixa de frequência, de tal forma que, conforme a frequência do sinal recebido ou transmitido um determinado dipolo entra em operação.



A principal característica da antena log-periódica é a sua grande largura de faixa, permitindo a operação da antena em uma larga faixa de frequência.

As antenas log-periódicas são encontradas nas faixas de HF, VHF e UHF, sendo que o maior número deste tipo de antenas ocorre na faixa de VHF. Seu uso na faixa de HF é limitado devido as dimensões necessárias às antenas nesta faixa. Já na faixa de UHF o que limita o seu emprego é a necessidade de antenas mais diretivas (figura acima).

O uso de antenas log-periódicas, para esse fim, apresenta a vantagem de cobrir todo o espectro de frequência, destinado a este tipo de transmissão, com uma ou duas antenas, pois este tipo de antena apresenta uma grande largura de faixa. Porém, nos casos onde necessita-se de uma antena com ganho mais elevado em determinados canais, o emprego deste tipo de antena fica limitado.

Propagação em Microondas

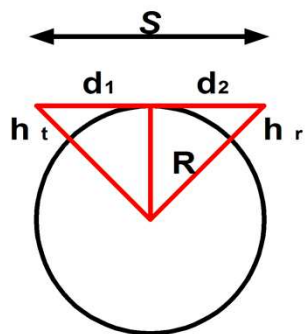
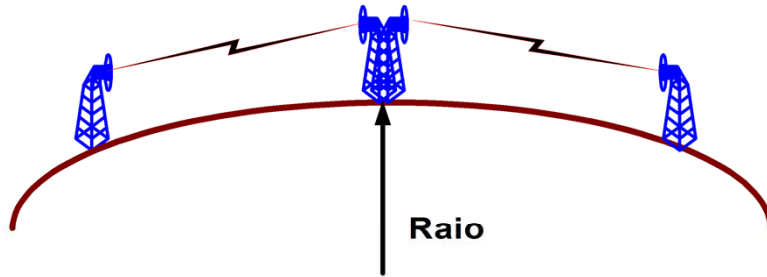
- São sistemas de propagação em visibilidade, permitem focalizar as ondas, de modo a minimizar a influência do terreno na energia propagada.
- Utiliza-se também em alguns casos do fenômeno da difração, estabelecendo-se ligações mesmo onde existe obstruções na linha de visada
- Estes sistemas são em geral utilizados com média capacidade.
- São normalmente empregados em comunicações a média distância, envolvendo poucas repetidoras

São sistemas de propagação em visibilidade, pois nessas faixas de frequências as antenas utilizadas já permitem focalizar as ondas, de modo a minimizar a influência do terreno na energia propagada. Utiliza-se também o fenômeno da difração, estabelecendo-se ligações mesmo onde existe obstruções na linha de visada.

Estes sistemas são em geral utilizados com média capacidade. São normalmente empregados em comunicações a média distância, envolvendo poucas repetidoras. Apresentam confiabilidade elevada em relação aos sistemas em HF, sendo de mais fácil operação, porém possuem menor alcance.

São utilizados nas redes estaduais de telecomunicações, em sistemas particulares de empresas (de energia elétrica, de água, etc.), sistemas de transmissão de TV (repetição e retransmissão), em serviços de segurança pública (polícia e bombeiro), sistemas de telefonia móvel e nas estações costeiras para comunicações de aproximação de navios do porto.

Horizonte Geométrico



$S = d_1 + d_2$, assumindo $d_1 = d_2$, por hipótese temos,

$$S = \sqrt{2R}(\sqrt{h_t} + \sqrt{h_r})$$

Raio médio da terra vale $R = 6371,2$ km

$$S = 3,569(\sqrt{h_t} + \sqrt{h_r}) \text{ [Km]}$$

A componente direta das ondas terrestres está sempre presente ao longo das faixas de VHF,UHF e SHF. Apresenta alcance praticamente visual a partir da antena transmissora

Isto significa que as antenas transmissora e receptora devem ter alturas suficientes para possibilitarem visada direta entre si, acima dos obstáculos existentes e da própria curvatura da Terra, conforme mostrado na figura acima. Para regiões de relevo não muito acidentado, dadas duas antenas, uma transmissora e outra receptora, cujas alturas chamaremos de h_t e h_r , respectivamente, calcula-se a distância máxima visual (S) como se mostra acima. o raio médio da terra vale $R = 6371,2$ km

Exercícios:

- 1) Calcular a distância máxima visual sabendo-se que $h_t=30$ m e $h_r=54$ m.

- 2) Deseja-se que a distância máxima visual entre duas antenas seja igual a 54 km. Calcular as alturas dessas duas antenas, supostamente iguais, numericamente.

- 3) Deseja-se que a distância máxima visual entre duas antenas seja igual a 58 km. Qual deverá ser a altura da antena receptora, já que a altura da antena transmissora vale 35 m.

Raio Terrestre Equivalente

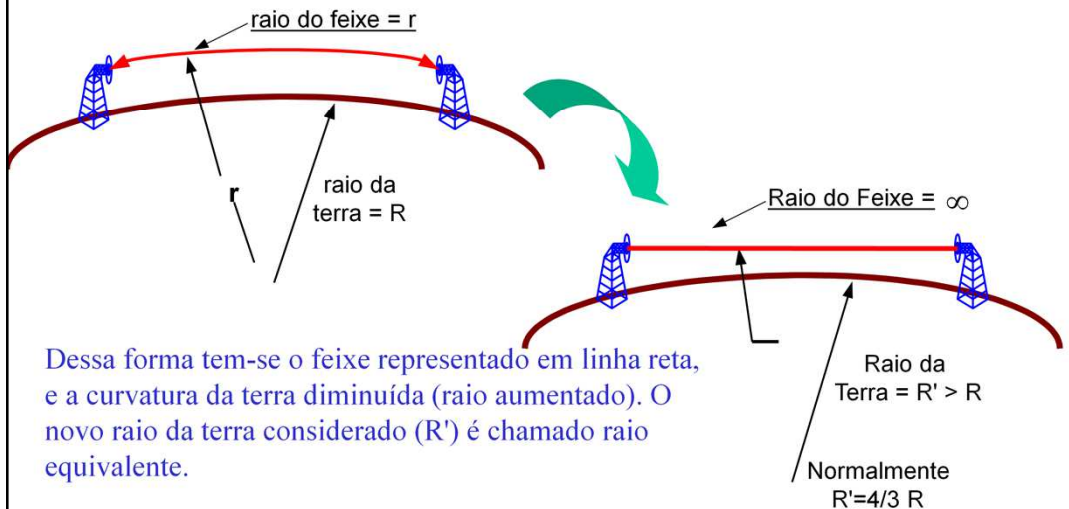
Na propagação através da superfície terrestre observa-se uma curvatura do feixe da onda eletromagnética no plano vertical, devido a sucessivas refrações que o mesmo sofre.



Na propagação através da superfície terrestre observa-se uma curvatura do feixe da onda eletromagnética no plano vertical, conforme apresentado na figura acima, devido a sucessivas refrações que o mesmo sofre.

Raio Terrestre Equivalente

Na análise da propagação da onda na atmosfera, usa-se o artifício de considerar o feixe sem curvatura, aumentando-se entretanto o raio da terra



Na análise da propagação da onda na atmosfera, usa-se o artifício de considerar o feixe sem curvatura, aumentando-se entretanto o raio da terra. Dessa forma tem-se o feixe representado em linha reta, e a curvatura da terra diminuída (raio aumentado). O novo raio da terra considerado (R') é chamado raio equivalente.

Assim, por exemplo, para a atmosfera padrão, tudo se passa como que o raio verdadeiro da terra se tornasse 4/3 vezes maior que seu valor real, isto é:

$R' = K.R$, onde K é o fator de curvatura da terra tomado igual 4/3.

$R' = 4/3 \cdot R = 1,33 \times 6371,2 \text{ km} = 8494,93 \text{ km}$

onde

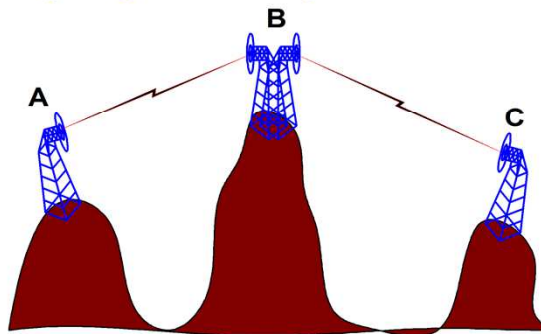
$$K = \frac{1}{1 + R \frac{dn}{dh}}$$

$(dn/dh) = -4.10^{-8} \text{ m}^{-1}$ (gradiente do índice de refração).

Este artifício facilita o trabalho de projeto das ligações, pois se pode considerar a onda que se propaga entre as antenas através de um feixe retilíneo. Existem cartas especiais desenhadas com a curvatura da terra para o valor do raio equivalente, sendo o perfil do relevo do terreno entre as antenas desenhados nestas cartas

Perfil do Terreno

Entende-se por perfil do terreno entre dois pontos, o traçado que fornece a altitude do relevo em relação a uma curva fictícia situada ao nível do mar e que liga estes dois pontos.



Ou, em outras palavras, é fundamental o conhecimento da topografia AB; BC e etc., conforme sugere a figura acima, por exemplo.

Na fase inicial de um projeto, cuja finalidade seja a da implantação de um rádio-enlace, quer em VHF ou UHF, é imperioso o traçado dos respectivos perfis altimétricos que vinculam aqueles lances. Ou, em outras palavras, é fundamental o conhecimento da topografia AB; BC e etc., conforme sugere a figura acima, por exemplo. Entende-se por perfil do terreno entre dois pontos, o traçado que fornece a altitude do relevo em relação a uma curva fictícia situada ao nível do mar e que liga estes dois pontos.

Propagação e Perda no Espaço Livre

- No espaço livre as ondas de rádio se propagam em “linha reta” sem a ocorrência de fenômenos como refração e reflexão.
- A atenuação do sinal é geométrica, uma vez que a energia irradiada tende a espalhar-se por esferas cada vez maiores

No espaço livre as ondas de rádio se propagam em “linha reta” sem a ocorrência de fenômenos como refração e reflexão.

A atenuação do sinal é geométrica, uma vez que a energia irradiada tende a espalhar-se por esferas cada vez maiores. Na verdade, um sinal é irradiado na forma geométrica de uma esfera, e à medida que o sinal transmitido se afasta do transmissor, ele é propagado em esferas cada vez maiores e nesse caso é aceitável tratar esse sinal como uma frente de ondas planas.

Perda na Propagação no Espaço Livre

De acordo com a Recomendação ITU-R PN.525-2, a perda no espaço livre é calculada pela expressão:

$$L_{el} = 20 \cdot \log\left(\frac{4 \cdot \pi \cdot d}{\lambda}\right)$$

L_{el} - perda no espaço livre (dB)

- d - distância
- λ - comprimento de onda, sendo que
- d e λ devem ser expressos na mesma unidade

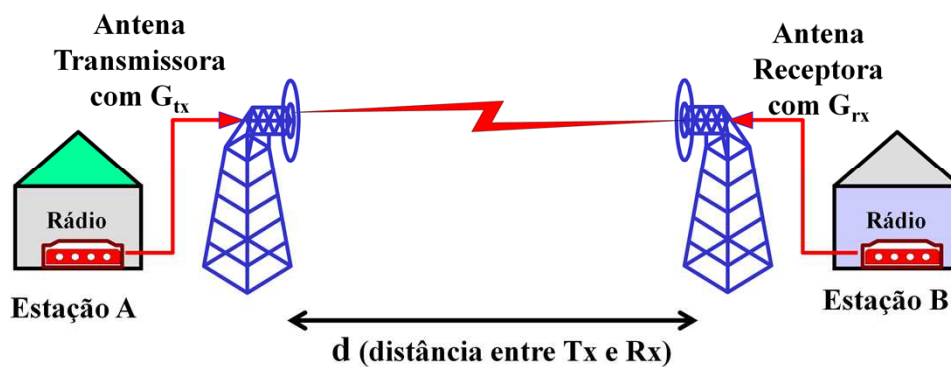
A perda no espaço livre pode ser calculada também utilizando a frequência no lugar do comprimento de onda:

$$L_{el} = 32.4 + 20 \log(f) + 20 \log(d)$$

f - frequência (MHz)

d - distância (Km)

Perda na Propagação no Espaço Livre



Neste caso considerando-se o ganho das antenas transmissora e receptora

Cálculo da Atenuação no Espaço em radio enlace com visibilidade

Portanto a atenuação em um enlace de antenas com visibilidade pode ser descrita pela seguinte equação:

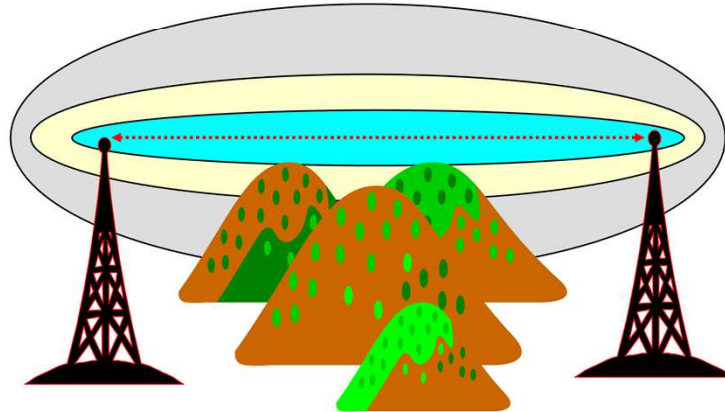
$$L_{el} = 32,44 + 20\log d(Km) + 20\log f(MHz) - 10\log G_{Tx} - 10\log G_{Rx}$$

É comum os ganhos das antenas serem obtidos a partir da comparação das antenas com uma antena dipolo de meia onda ($G_{dipolo\lambda/2} = 2,15$ dB).

$$L_{el} = 28,14 + 20\log d(Km) + 20\log f(MHz) - 10\log G_{Tx} - 10\log G_{Rx}$$

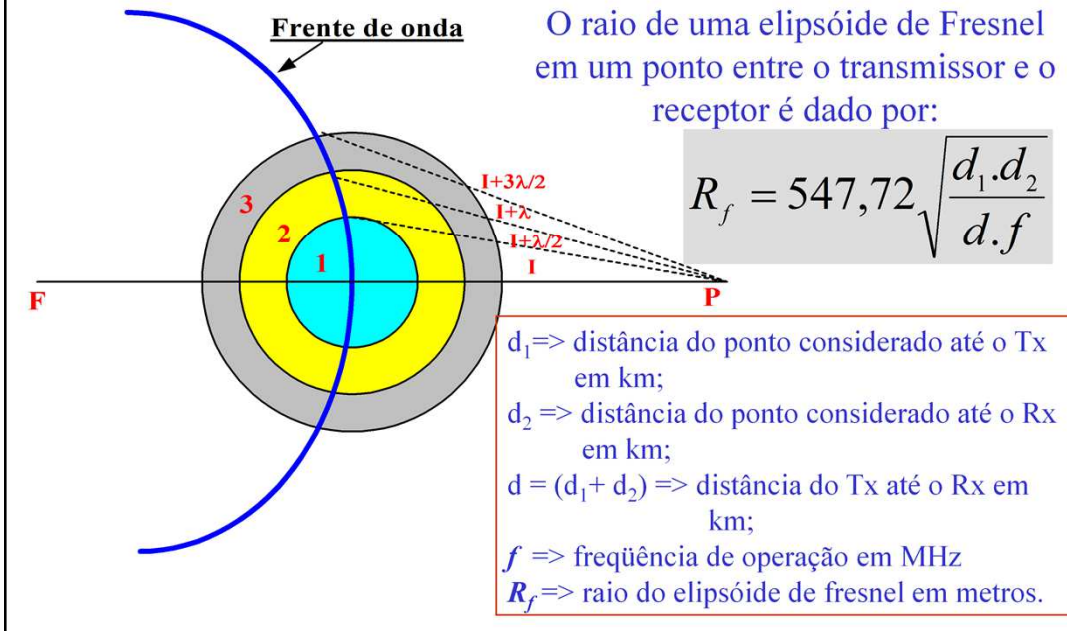
Zona de Fresnel

- A energia carregada por uma onda eletromagnética fica espalhada por todo espaço ao redor da linha visada, em regiões chamadas zonas de Fresnel.
- As zona adjacentes estão sempre em oposição de fase



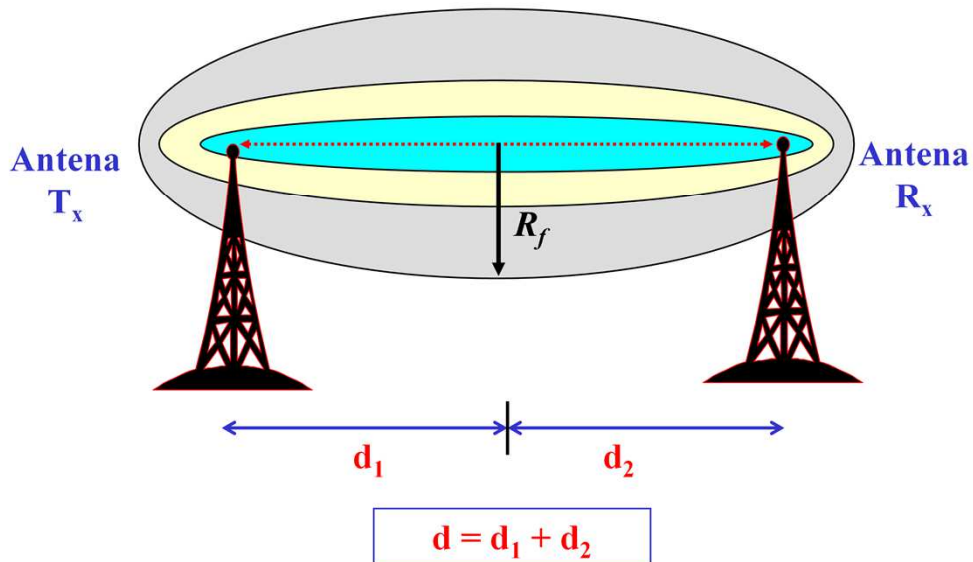
Fresnel estabeleceu que a quantidade de energia transmitida ao longo do espaço livre e recebida num determinado ponto, ao longo da trajetória, está contida no volume de um elipsóide cujo tamanho depende do comprimento da onda e da distância entre o transmissor e o receptor. Assim, a energia carregada por uma onda eletromagnética não está contida apenas na linha de visada direta. Esta fica espalhada por todo espaço ao redor dessa linha, em regiões chamadas zonas de Fresnel.

Zona de Fresnel



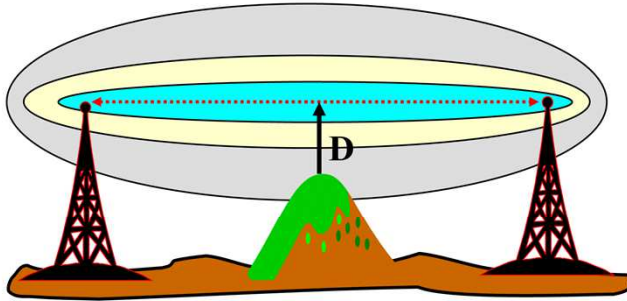
As zonas de Fresnel são elipsóides de revolução sendo que as três primeiras são as mais importantes, pois contém quase toda a energia da onda. A medida em que a ordem aumenta a contribuição em termos de energia diminui. Outro aspecto interessante é que as zonas de Fresnel são alternadamente construtivas e destrutivas, ou seja, o sinal na primeira zona está em oposição de fase com o sinal da segunda. Desta forma, quando a obstrução bloqueia a segunda zona de Fresnel, acontece um ganho no sinal pois o sinal em oposição de fase é barrado.

Raio de Fresnel



No interior do volume da elipsóide está contida a energia transmitida, e obstáculos nesse caminho são considerados obstruções se impedem até aproximadamente 40% da “visibilidade”. A partir daí as obstruções passam a ser fatores de atenuação consideráveis.

Obstáculos na Zona de Fresnel



Obstáculos no caminho são considerados obstruções se impedem até aproximadamente 40% da “visibilidade”.

O ponto crítico da obstrução pode ser medido pela relação:

$$\frac{D}{R_f} \geq 0,6 \quad \text{Percurso livre}$$

$$\frac{D}{R_f} \leq 0,6 \quad \text{Percurso com obstrução}$$

D – distância entre o eixo central da elipsóide e a superfície em análise

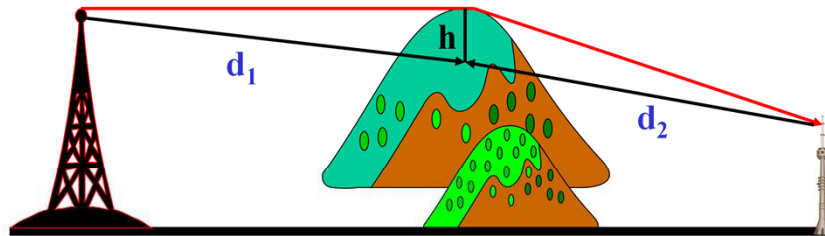
No interior do volume da elipsóide está contida a energia transmitida, e obstáculos nesse caminho são considerados obstruções se impedem até aproximadamente 40% da “visibilidade”. A partir daí as obstruções passam a ser fatores de atenuação consideráveis. D – distância entre o eixo central da elipsóide e a superfície em análise

Exercício:

Exemplo 4: Para um circuito de radioenlace, onde a frequência utilizada é de 900 MHz, a distância total entre a antena Tx e Rx é de 120 km, determinar o raio do elipsóide de Fresnel nos pontos:

- a) $d_1 = 60$ km
- b) $d_2 = 100$ km
- c) $d_1 = 80$ km
- d) $d_2 = 30$ km
- e) $d_1 = 30$ km

Modelo Teórico para Perdas por Difração

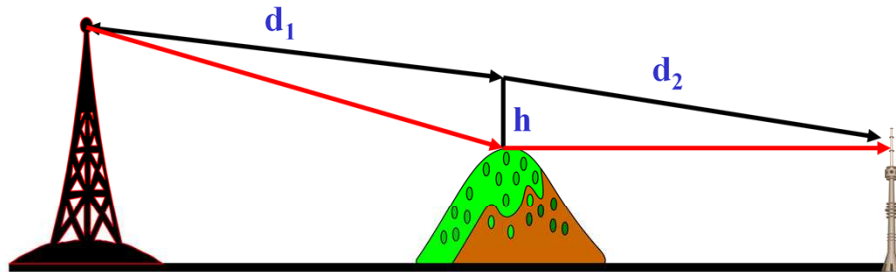


$$v = -h \sqrt{\frac{2(d_1 + d_2)}{\lambda(d_1 \cdot d_2)}}$$

v é um parâmetro dependente do percentual de liberação do raio de Fresnel

λ é o comprimento de onda

Modelo Teórico para Perdas por Difração



$$v = -h \sqrt{\frac{2(d_1 + d_2)}{\lambda(d_1 \cdot d_2)}}$$

v é um parâmetro dependente do percentual de liberação do raio de Fresnel

λ é o comprimento de onda

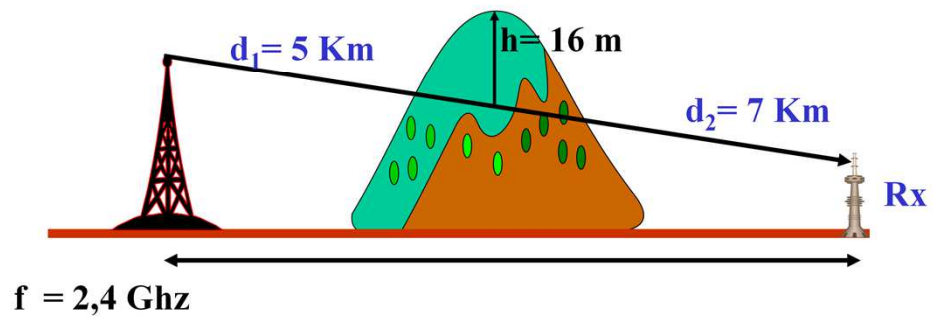
Modelo Teórico para Perdas por Difração (L_{dif})

$$L_{dif}(h) = \begin{cases} 0 & 1 \leq \nu \\ -20 \log\left(\frac{1}{2} + 0,62\nu\right) & 0 \leq \nu < 1 \\ -20 \log\left(\frac{e^{0,95\nu}}{2}\right) & -1 \leq \nu < 0 \\ -20 \log\left[0,4 - \sqrt{0,1184 - \left(\frac{\nu}{10} + 0,38\right)^2}\right] & -2,4 \leq \nu < -1 \\ -20 \log\left(-\frac{0,225}{\nu}\right) & \nu < -2,4 \end{cases}$$

O problema prático é que em geral há mais do que um obstáculo no caminho da propagação. Alguns modelos simplificados podem ser adotados, porém o cálculo de vários obstáculos é um grande problema matemático, e talvez a modelagem numérica possa ser a ferramenta apropriada.

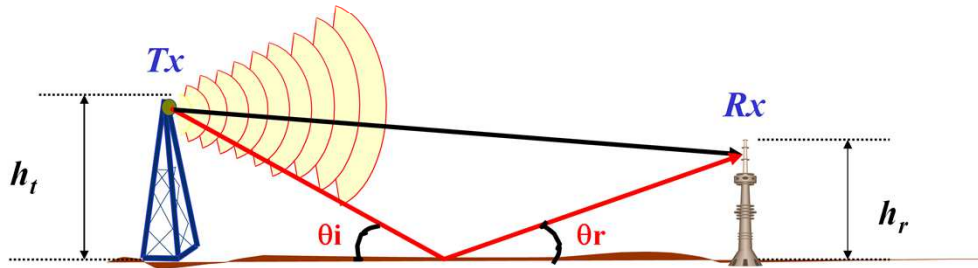
Exercício:

Calcular as perdas por difração na situação abaixo.



Modelo do Terreno Plano (Modelo com reflexão no solo)

Um modelo para o cálculo de perdas do sinal em terrenos planos ou quase planos é aquele que considera o sinal no receptor como uma combinação de uma onda que se propaga por um caminho direto, e uma onda refletida no solo.



Modelo do Terreno Plano (Modelo com reflexão no solo)

A potência recebida por **Rx** pode ser expressa por:

$$P_r = P_t G_t G_r \frac{h_t^2 h_r^2}{d^4}$$

A perda por reflexão é dada por:

$$L_{reflexão} = -10\log(G_t) - 10\log(G_r) - 20\log(h_t h_r) + 40\log(d)$$

G_t e G_r são os ganhos das antenas transmissora e receptora respectivamente, h_t e h_r são as alturas das antenas transmissora e receptora dadas em metros e d é a distância entre as antenas em metros.

Exercício:

1) Dadas as condições a seguir, calcular a potência do sinal no receptor em dB_m , para uma distância de 5 km:

Admitindo:

- Propagação no espaço livre

Frequência de operação: $f = 2,4 \text{ GHz}$;

Antena Tx: 50m e 10 W;

Antena Rx: 20m.

* Considerar o ganho das antenas Tx de 30 dB e Rx de 25dB

Qual deve ser a perda por reflexão neste sistema?

2) Calcular a área de cobertura de antena isotrópica para os seguintes dados:

Admitir, perda somente no espaço livre;

$f = 900 \text{ MHz}$;

$P_t = 10 \text{ W}$; $P_{r(\text{MIN})} = -70 \text{ dBm}$;

Considerar o ganho das antenas Tx e Rx unitário

Ruído em Microondas

Em sistemas de microondas uma importante medida é a quantidade *Sinal-Ruído*, chamada de *Relação Sinal-Ruído*, que é dada pela relação entre a potência total do sinal recebido e a potência do ruído:Essa relação é dada por:

$$\frac{S}{N} = \frac{P_r}{kT_n B}$$

que geralmente é definida em decibéis por:

$$Sinal / Ruído = 10 \log_{10} \left(\frac{S}{N} \right) \quad (\text{dB})$$

O ruído pode ser entendido como um conjunto de ondas planas de amplitudes, fase e polarizações randômicas, mudando no decorrer do tempo. Obviamente o nível do sinal de ruído é muito baixo, porém ele sempre estará presente em qualquer sistema de transmissão e recepção. Justamente na recepção é que o ruído irá preocupar, pois é aí que seus efeitos serão significativos.

Há basicamente 3 categorias de ruídos importantes em sistemas de microondas:

- Ruído natural devido à movimentação das cargas, como elétrons em produtos de estado sólido ou a vácuo; inclui ainda ruído térmico devido à temperatura dos objetos. Esse ruído afeta produtos eletrônicos e é adicionado ao sinal desejado.
- Ruído irradiado por corpos naturais, como a Terra, vegetação, e também pelas estrelas.
- Ruído causado por equipamentos feitos pelo homem. São chamados de interferências e são adicionados de forma não intencional em todos os sistemas de transmissão de rádio e microondas, e tende a aumentar consideravelmente.

Em sistemas de microondas uma importante quantidade é chamada de *Relação Sinal-Ruído*, que é dada pela relação entre a potência total do sinal recebido e a potência do ruído.

Fatores que contribuem para a degradação da taxa de erros de bits nos radioenlaces

- Interferências por descargas atmosféricas
- desvanecimentos longos
- multipercurso
- difração por obstrução

Influência dos parâmetros geo-climáticos no dimensionamento dos radioenlaces

➤ Atenuações devido a chuvas

Com a utilização de frequência superiores a 10 GHz a atenuação causada pela chuva passa a ser crítica e é um fator que limita os comprimentos dos enlaces, sendo que chuvas intensas constituem umas das principais causas de interrupção de sistemas de radioenlaces.

➤ Atenuações causadas pela atmosfera

Considerada apenas nos projetos de radioenlaces em frequências muito altas, apesar de ser muito menor do que a atenuação causada pela chuva. A atenuação total é da ordem de décimos de dB. Basicamente esta atenuação é causada por dois componentes da atmosfera: oxigênio e vapor d'água

Atenuação devido as chuvas:

Com a utilização de frequência superiores a 10 GHz a atenuação causada pela chuva passa a ser crítica no projeto de rádio enlaces utilizando esta faixa de frequência. Na faixa superior a 10 GHz , a indisponibilidade causada pelas chuvas é o fator que limita os comprimentos de enlaces.

Chuvas intensas constituem umas das principais causas de interrupção de sistemas de radioenlaces, cabendo ao planejamento de sistemas de rádio otimizar os parâmetros de projeto de forma a alcançar a disponibilidade mínima recomendada pela ITU-R

Atenuações causadas pela atmosfera:

A atenuação do sinal de rádio causada pela atmosfera deve ser considerada nos projetos de radioenlaces em frequências muito altas, apesar de ser muito menor do que a atenuação causada pela chuva. A atenuação total é da ordem de décimos de dB, de forma que não afeta significativamente o desempenho do enlace. Basicamente esta atenuação é causada por dois componentes da atmosfera: oxigênio e vapor d'água. Existem modelos de cálculos recomendado pela ITU-R que apresentam a forma de cálculo da atenuação por gases atmosféricos, que podem variar de 1 a 1000 GHz e de forma simplificada de 1 a 350 GHz.

Técnica de melhorias de desempenho de radioenlaces

Diversidade:

As técnicas de diversidade procuram reduzir os efeitos dos desvanecimentos, usando mais de um receptor em casos de regiões com desvanecimentos profundos, combinando-os e selecionando-os para obter a melhor recepção possível.

Estas técnicas podem ser implementadas de diversas formas:

- **Diversidade de espaço**
- **Diversidade de frequência**
- Diversidade de polarização
- Diversidade de rota

Diversidade:

As técnicas de diversidade procuram reduzir os efeitos dos desvanecimentos, usando mais de um receptor em casos de regiões com desvanecimentos profundos, combinando-os e selecionando-os para obter a melhor recepção possível.

Os sinais recebidos por esses receptores devem ter pouca correlação entre si em termos de qualidade de recepção, ou seja, eles não podem sofrer deterioração de qualidade ao mesmo tempo.

Para implementar esta técnica de mais de uma recepção, muitos são os recursos possíveis. Por exemplo: recepção por diferentes antenas (em diferentes frequências de RF e também diferentes polarizações).

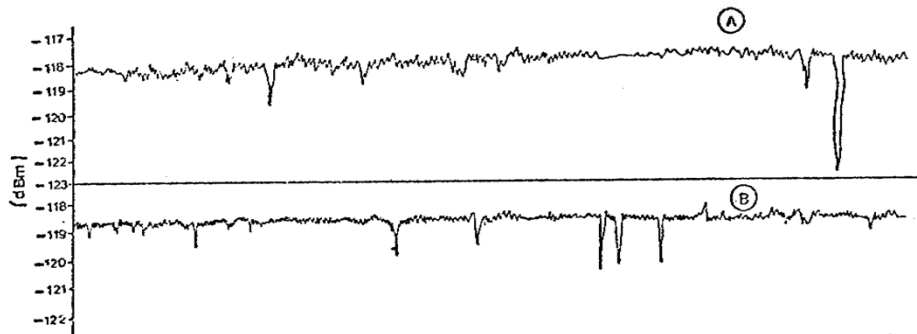
Estas técnicas são conhecidas como:

- **Diversidade de espaço**
- **Diversidade de frequência**
- Diversidade de polarização
- Diversidade de rota

As técnicas de diversidade de espaço e frequência são mais comumente utilizadas.

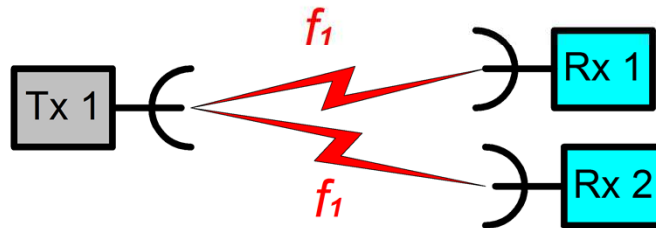
Diversidade

Os gráficos mostram uma mesma transmissão recebida em dois locais diferentes, de forma que quando uma antena está recebendo um nível baixo a outra não está, permitindo assim aproveitar o sinal de nível mais elevado.



Diversidade de Espaço

- A mesma informação é transmitida por dois caminhos diferentes
- A diversidade de espaço para enlaces visado consiste em colocar duas antenas de recepção num mesmo plano vertical



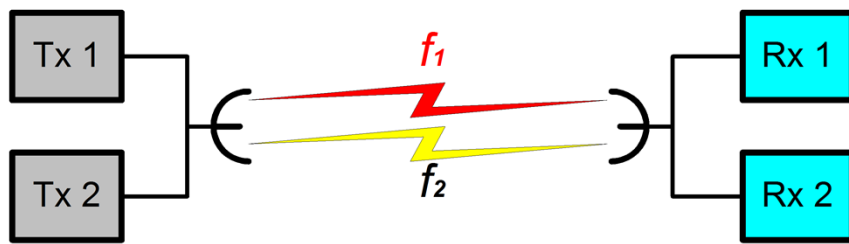
Geralmente são utilizadas duas antenas, em casos extremamente críticos podem ser utilizadas três antenas

A técnica de diversidade de espaço para enlaces visado consiste em colocar duas antenas de recepção num mesmo plano vertical, ou seja uma principal no ponto mais alto e uma auxiliar alguns metros mais abaixo, montadas na mesma torre.

Na diversidade em espaço, são empregadas no caso de diversidade dupla, uma antena transmissora e duas antenas receptoras; no caso de diversidade quádrupla empregam-se duas antenas transmissoras e duas receptoras.

Diversidade em Frequência

O mesmo sinal é enviado por dois canais de RF com frequências diferentes, havendo na recepção uma seleção do melhor sinal



Na diversidade de frequência o mesmo sinal é enviado por dois canais de RF com frequências diferentes, havendo na recepção uma seleção do melhor sinal. O espaçamento entre as frequências para existir baixa correlação entre os sinais deve ser igual ou maior que 5% da frequência mais alta, embora um espaçamento de 2% já produza uma decorrelação acentuada entre os dois sinais.

Conclusões sobre a diversidade

- O **uso da diversidade** melhora o nível de sinal na recepção, ou seja, **aumenta a confiabilidade do enlace**.
- É evidente que **há um preço a pagar**, no caso, o preço traduz em mais equipamentos: duas antenas, duas torres, dois guias, dois receptores, etc.
- **Na decisão** de se usar ou não diversidade **deve-se levar em conta**, de um lado, o aumento da confiabilidade que se traduz em **renda para a empresa** (aumenta o tempo em que o sistema está a disposição do usuário com qualidade conhecida) **e de outro**, o **aumento das despesas** (investimentos, despesas operacionais e despesas de manutenção).
- **Na prática**, a **diversidade em espaço é mais efetiva** que a diversidade em frequência, pois não ocupa muito o espectro de frequência, sendo desta forma a mais utilizada.