

ANGELO ANTÔNIO LEITHOLD

**ESTUDO BÁSICO DE ELETROMAGNETISMO E ANTENAS
CAPÍTULO 1**

**CURITIBA
1991**



ESTUDO BÁSICO DE ELETROMAGNETISMO E ANTENAS by [ANGELO ANTONIO LEITHOLD PYSAAL](#) is licensed under a [Creative Commons Atribuição-Uso Não-Comercial-Vedada a Criação de Obras Derivadas 3.0 Brasil License](#).

1.1 Definição básica

Antena = transição entre propagação guiada (circuitos) e propagação não-guiada (espaço).

Antena transmissora: transforma elétrons em fótons;

Antena receptora: transforma fótons em elétrons.

A definição de antena pode variar conforme o fim a que se destina. Numa forma mais geral, é um dispositivo desenhado de maneira a transmitir ou receber energia. Quando no modo recepção, converte ondas eletromagnéticas em correntes elétricas, na transmissão, ocorre o contrário, transforma corrente elétrica em onda eletromagnética. Também se a pode definir como uma estrutura metálica com determinada área e comprimento que pode ressonar na frequência requerida quando ressonante, ou pode ser "condicionada" a responder em frequências diversas, quando não ressonante. É o elo mais importante da cadeia de transmissão-recepção por radiofrequência.

A utilização das antenas abrange uma ampla faixa, desde sistemas de rádio, televisão, comunicação ponto a ponto, radar, exploração do espaço, dentre outras. Funciona em qualquer meio, seja no ar, no espaço, inclusive meios líquidos e sólidos, conforme a frequência. Fisicamente, é um transdutor que "casa" condutores que geram um campo eletromagnético irradiando-o em resposta a uma tensão e corrente alternadas associadas.

Também ao ser inserida num campo eletromagnético, em si ocorre a indução de corrente e tensão alternadas que, através de uma linha de transmissão, são conduzidas a um receptor.

CONCEITOS IMPORTANTES

-> Antena Isotrópica: Fonte pontual que radia potência igualmente em todas as direções (onda esférica);

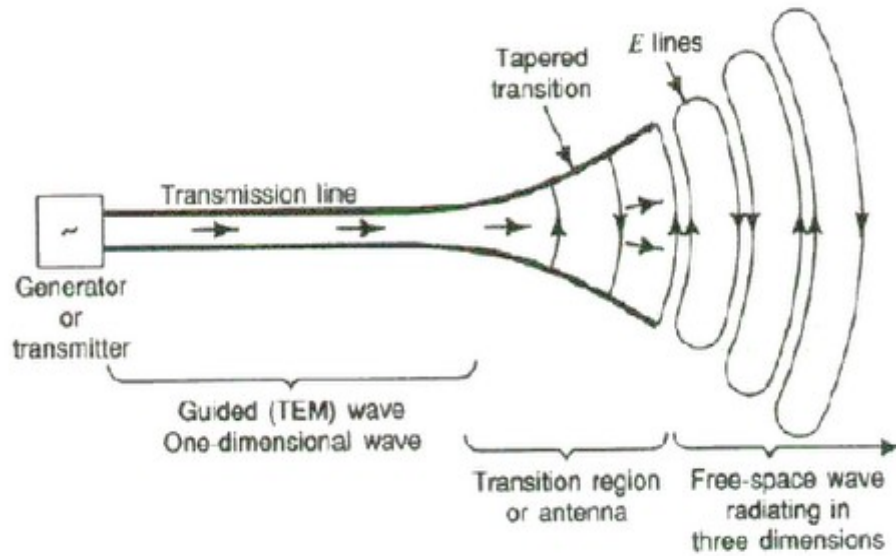
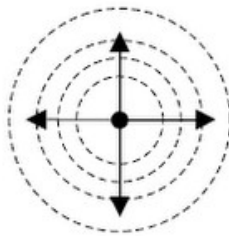


FIGURA 1.1 : Definição básica de uma antena.



Antena Isotrópica

Potência total transmitida: P_T

Densidade de potência média (a uma distância r da fonte):

$$S_{\text{med}} = \frac{P_T}{4\pi r^2} \quad [\text{W/m}^2]$$

Vetor de Poynting:

$$\vec{\Phi} = \vec{E} \times \vec{H}$$

Valor médio (no ar, E e H perpendiculares):

$$\Phi_{\text{med}} = \frac{1}{2} \vec{E} \cdot \vec{H} = \frac{1}{2\eta_0} E^2 \quad \text{com } \eta_0 = 120\pi \Omega$$

Campo elétrico a uma distância r da fonte: $\Phi_{\text{med}} = S_{\text{med}}$

$$\frac{P_T}{4\pi r^2} = \frac{1}{2\eta_0} E^2$$

$$E = \frac{\sqrt{60 P_T}}{r} \quad [\text{V/m}] \quad (\text{antena isotr\u00f3pica})$$

Exemplo: Uma antena isotr\u00f3pica transmite uma pot\u00eancia de 5 kW. Calcular a densidade de pot\u00eancia e o campo el\u00e9trico a 1 km da fonte.

$$S_{\text{med}} = \frac{P_T}{4\pi r^2} = \frac{5 \times 10^3}{4\pi \times (10^3)^2}$$

$$S_{\text{med}} = 398 \mu \text{W/m}^2$$

$$E = \frac{\sqrt{60 P_T}}{r} = \frac{\sqrt{60 \times 5 \times 10^3}}{10^3}$$

$$E = 0,548 \text{ V/m}$$

No exemplo acima: Uma aplica\u00e7\u00e3o pr\u00e1tica de c\u00e1lculo, exemplo que servir\u00e1 para balizar como ler esta obra..

1.2 Hist\u00f3rico do Eletromagnetismo

Antiguidade

- 900 a.C. Magnus, um pastor de ovelhas grego caminha sobre um campo de pedras que atraem seu cajado. A regi\u00e3o chama-se Magn\u00e9sia;
- \~ 600a.C. Gr\u00e9cia Antiga: os gregos j\u00e1 conheciam algumas propriedades el\u00e9tricas. O \u00e2mbar quando atritado poderia atrair objetos leves - Tales de Mileto;
- \~ 480 a.C. Atomismo: Leucipo de Mileto e Dem\u00f3crito, de Abdera, elaboraram a hip\u00f3tese de a mat\u00e9ria ser constitu\u00edda por \u00e1tomos;
- 295 a.C. Eucilhes publica estudos de \u00f3ptica;
- \~ 121 d.C. Primeiros fen\u00f4menos magn\u00e9ticos foram observados com \u00edm\u00e3s permanentes provenientes da regi\u00e3o da Magn\u00e9sia pelos gregos 800 a.C., Lucretius, etc. Desde 121 d.C. os chineses j\u00e1 conheciam propriedades magn\u00e9ticas e sabiam que uma barra de ferro poderia ser imantada na presen\u00e7a de um \u00edm\u00e3 natural. Conheciam o efeito b\u00fassola.

Idade Moderna

1088 : Bússola pela primeira vez é descrita por Shen Kua Yao (1040);

1269 : Pierre de Maricourt (Peirus Peregrinus) descobre que ímãs naturais esféricos (pedra-ímã) alinham agulhas com linhas de longitude apontando entre dois pólos sobre a pedra;

Sec. XVI Girolamo Cardano (1501-1576) elabora a diferença entre âmbar e pedra-ímã;

1600: o inglês William Gilbert publica *De magnete*, sobre eletricidade e magnetismo. O próprio globo terrestre é um grande ímã. Fenômenos ligados ao magnetismo: 1. Atração; 2. Alinhamento com a direção Norte-Sul; 3. Declinação, ou desvio em relação ao meridiano; 4. Inclinação (o ângulo em relação ao plano horizontal); 5. Revolução ou movimento circular. O primeiro tratado sobre eletricidade: distinção entre os fenômenos magnéticos e os elétricos: todos os materiais (âmbar) que atraem palha (e outros objetos leves) quando atritados. Fabricou o primeiro eletroscópio. A rotação da Terra está relacionada com o magnetismo;

Séc XVII: Galileu Galilei e o nascimento da Física.

1600 – 1700: Robert Boyle, Stephen Gray, Charles Duffay, que estudam a condução e tipos de cargas elétricas;

1648: em Óptica o holandês Willebrordus Snellius descobre a lei da refração da luz.

1665: em 1665 Isaac Newton faz suas primeiras hipóteses sobre gravitação. Newton propõe a teoria corpuscular da luz.

1676: o dinamarquês Olaus Römer descobre que a velocidade da luz é finita.

1678: Huygens descobre a polarização da luz.

1687: Newton publica *Philosophiae naturalis principia mathematica*, em que enuncia a lei da gravitação universal e resume suas descobertas.

1690: Huygens formula a teoria ondulatória da luz.

1745: o alemão Ewald Jürgen von Kleist inventa o capacitor elétrico - garrafa de Leyden.

1750: Benjamin Franklin propõe um modelo: um único fluido com dois estados de eletrificação. Conservação de carga elétrica total de dois tipos: positivas e negativas;

1750: John Mitchell: A ação de um ímã sobre outro pode ser deduzida a partir de uma lei de força que varia com o inverso do quadrado da distância entre os pólos individuais do ímã.

1767 Joseph Priestley: “Não há carga elétrica dentro de um corpo metálico”.

1772: Henry Cavendish: *An Attempt to Explain some of the Principal Phenomena of Electricity, by Means of an Elastic Fluid*. Experimentos não-publicados: estudos de capacitância e medidas de correntes elétricas;

1785: o francês Charles Augustin Coulomb enuncia a lei das forças eletrostáticas e inaugura um novo rumo para a pesquisa em eletricidade e magnetismo: independentemente inventa uma balança de torsão e mostra a lei do inverso do quadrado da distância para as cargas elétricas; verifica a lei de Mitchell para ímãs e sugere ser impossível separar dois pólos sem criar mais dois pólos em cada parte do ímã.

1791: Luigi Galvani: Comentários sobre a Força Elétrica nos Movimentos Musculares;

1799: Alessandro Volta: Pilha Voltaica;

Idade Contemporânea

1799: o alemão Friedrich Herschel descobre a existência dos raios infravermelhos.

1801: o inglês Thomas Young descobre as interferências luminosas. O alemão Carl Ritter descobre o raio ultravioleta.

1811: o inglês Humphry Davy inventa o arco elétrico. O francês Augustin Fresnel faz pesquisas sobre a difração da luz.

1819: o francês Augustin Fresnel desenvolve a teoria ondulatória da luz.

1820: André Marie Ampère (1775-1836): “Duas correntes se atraem quando se movem paralelamente, no mesmo sentido e se repelem quando se movem paralelamente, em sentidos contrários”. A deflexão da agulha de uma bússola causada por uma corrente elétrica poderia ser usada para medir a intensidade da corrente (princípio do galvanômetro). Modelo de ímãs em termos de correntes elétricas moleculares. Sua formulação inaugura o estudo da eletrodinâmica independentemente da eletrostática; Laplace calcula a força eletromagnética. Os franceses Jean-Baptiste Biot e Félix Savart encontram uma expressão para a intensidade da força magnética produzida por um pequeno segmento de um fio conduzindo uma corrente elétrica. Hans C. Oersted descreve o desvio produzido pelas correntes elétricas sobre a agulha da bússola.

- 1821: Fresnel efetua as primeiras medições de comprimento de onda elétrica.
- 1827: o alemão Georg Ohm formula a lei que relaciona o potencial, a resistência e a corrente elétrica.
- 1831: Faraday descobre a indução eletromagnética e concebe o conceito de campo de forças. Henry chega aos mesmos resultados. James Clerk Maxwell afirma o caráter eletromagnético da luz.
- 1833: o russo Heinrich Lenz determina a lei de sentido das correntes induzidas.
- 1834: Faraday formula as leis da eletrólise. Wheatstone descobre o processo para medir a velocidade de uma carga elétrica num campo condutor.
- 1839: o francês Antoine Becquerel descobre a célula fotovoltaica.
- 1846: o alemão Ernest Weber constrói o primeiro eletrodinamômetro, para medir a força de atração entre cargas elétricas.
- 1849: o francês Armand Fizeau mede a velocidade da luz.
- 1851: o alemão Franz Ernst Neumann formula a lei da indução eletromagnética.
- 1855: o francês Leon Foucault descobre as corrente induzidas nos condutores metálicos.
- 1865: o escocês James Clerk Maxwell expõe a teoria eletromagnética da luz.
- 1873: Maxwell publica o seu *Treatise on Electricity and Magnetism*.
- 1880: James Wimshurt, inglês inventa o gerador eletrostático.
- 1881: o inglês James Alfred Ewing e o alemão Emil Warburg descobrem a histeresse magnética (campo residual de um objeto ferromagnético).
- 1884: o americano Thomas Edison faz a primeira válvula eletrônica.
- 1887: o alemão Heinrich Rudolf Hertz descobre o efeito fotoelétrico. Os americanos Albert Michelson e Edward Williams Morley mostram a constância da velocidade da luz.
- 1888: trabalhando separadamente, Hertz e Oliver Lodge estabelecem que as ondas de rádio pertencem à mesma família das ondas de luz.
- 1895: Jean-Baptiste Perrin, francês demonstra que os raios catódicos transportam eletricidade negativa. O alemão Wilhelm Röntgen descobre os raios X. O holandês Hendrik A. Lorentz desenvolve um modelo atômico que permite explicar a estrutura fina dos espectros atômicos, e dá contribuições fundamentais para a Eletrodinâmica dos corpos em movimento (força de Lorentz).
- 1896: Ernest Rutherford, da Nova Zelândia, descobre o processo de detecção magnética das ondas eletromagnéticas. Marconi entre 1896 e 1902 - Invenção da radiotransmissão. (Brasileiro Padre Landell de Moura também).
- 1901: Planck inicia a Mecânica Quântica com estudos sobre a radiação do corpo negro. O russo Piotr Liebedev prova experimentalmente a pressão da luz.
- 1902: Oliver Heaviside, inglês afirma existir uma camada atmosférica que favorece a refração das ondas de rádio.

1905 Lorentz, Einstein, Poincarè e outros desenvolvem a Teoria Especial da Relatividade, que nasce a partir do Eletromagnetismo. Conceito de fóton é introduzido por Einstein, na explicação para o efeito fotoelétrico (caráter corpuscular da radiação).

1911: o americano Robert Millikan mede a carga do elétron.

1913: o alemão Johannes Stark descobre a ação do campo elétrico sobre a luz . O dinamarquês Niels Bohr formula a teoria da estrutura atômica segundo a teoria quântica.

1920 Wolfgang Pauli, Werner Heisenberg, Bohr, Paul Dirac, Erwin Schroedinger e outros desenvolvem formalmente a Mecânica Quântica.

1932: o americano Robert van der Graeff constrói a primeira máquina eletrostática.

Déc.1920 Wolfgang Pauli, Werner Heisenberg, Bohr, Paul Dirac, Erwin Schroedinger e outros desenvolvem formalmente a Mecânica Quântica.

1932: o americano Robert van der Graeff constrói a primeira máquina eletrostática.

Déc.1940 Eletrodinâmica Quântica por Feynmann, Tomonaga e outros. É uma das teorias mais bem sucedidas da Física.

Assim, de acordo com o disposto acima, e num comentário, sabe-se que os antigos navegadores já relatavam que os raios desviavam as agulhas das bússolas, o físico e médico inglês William Gilbert (1544 - 1603), pesquisador do magnetismo e eletricidade, propôs que ambos seriam efeitos distintos apesar de provocarem atração e repulsão. O principal trabalho de Gilbert foi “De Magnete, Magneticisque Corporibus, et de Magno Magnete Tellure (Sobre os ímãs, os corpos magnéticos e o grande ímã terrestre)” publicado em 1600. Apesar das pistas apontarem para o fenômeno eletromagnético não se descobrira uma relação entre os raios e o magnetismo. Em 1752, o cientista norte americano Benjamin Franklin (1706 - 1790), em suas experiências com a eletricidade propôs que os raios eram um fenômeno elétrico. Em 1802 o cientista italiano Gian Domenico Romagnosi (1761 - 1835) descobriu o efeito magnético e elétrico, publicando os resultados de suas experiências nos jornais de Trento e Rovereto na Itália e enviando os seus artigos para a Academia de Ciências de Paris, contudo a Comunidade Científica o ignorou. Em 1820 o físico dinamarquês Hans Christian Ørsted (1777 - 1851), descobre finalmente as bases do eletromagnetismo fazendo um experimento análogo ao de Romagnosi com um fio conectado a uma pilha que provocava um desvio na agulha de uma bússola que estivesse próxima. O físico italiano Guglielmo Marconi (1874-1937) e o físico alemão Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894), têm a si atribuídas as primeiras conceituações com relação ao projeto de antenas.

Em 1888, Hertz demonstrou a existência das ondas eletromagnéticas previstas pela teoria do físico escocês James Clerk Maxwell (1831-1879). O físico alemão inovou ao inserir um dipolo no ponto focal de um refletor parabólico metálico. Seus trabalhos foram publicados na “Annalen der Physik und Chemie (Vol. 36, 1889)”.

O empresário-inventor norte americano Thomas Alva Edison (1847-1931), em 1885 utilizou dispositivos que seriam mais tarde considerados também como “antenas”. Estes foram patenteados nos EE.UU (Patente 465.971) como precursores das antenas primitivas.

As primeiras antenas produzidas por Hertz eram duas placas de metal conectadas a dois bastões metálicos ligados a duas esferas separadas entre si por uma distância pré-determinada. Nas esferas era adaptada uma bobina que gerava descargas por centelhamento. As centelhas por sua vez, ao atravessar o espaço entre as esferas, produziam ondas eletromagnéticas nos bastões.

A origem da palavra antena se atribui ao físico Marconi, quando em 1895, executava nos Alpes em Salvan, Suíça, na região de Mont Blanc, experimentos com equipamentos que mais tarde, depois de aprimorados, seriam utilizados em telefonia móvel.

No início das experiências com antenas, estas foram sendo nomeadas conforme seus inventores. A antena de Hertz, por exemplo, é um conjunto de terminais que não requerem a presença de um terreno para seu funcionamento, não obstante, a antena de Tesla, necessita de uma base. Quando se inserem elementos além dos “fios” propriamente ditos, os dispositivos passam a ter as chamadas “cargas de antena”, (o que será visto mais adiante), estas alteram de forma apreciável o comportamento elétrico através da inserção de componentes indutivos e/ou capacitivos, modificando assim o seu padrão de funcionamento. Dentre os diversos dispositivos a ser estudados, as antenas plano terra e direcionais serão vistas com mais detalhes.

1.3 Ondas de rádio e antenas, uma breve descrição

As ondas de rádio se propagam através do espaço, seja no ar, vácuo ou qualquer meio, dependendo da frequência. Existem algumas propriedades fundamentais que devem ser observadas, destas derivam seu comportamento e a propagação. Por exemplo, se deslocando pela superfície da Terra têm um determinado comportamento, no espaço livre, ou através de líquidos ou meios de alta densidade outros comportamentos distintos.

Sabe-se que a radiofrequência quando se propaga, é uma radiação eletromagnética cujas principais propriedades são: a Intensidade de campo, Polarização, Frequência e Direção de deslocamento.

O comportamento das ondas de rádio é semelhante às da luz (em todo o espectro), dos raios-X, do calor, dos raios cósmicos e outras ondas eletromagnéticas não mencionadas. Sua velocidade de propagação é dependente do meio, no espaço e ao ar livre se utiliza o valor de 300.000 km/s. Quando se propaga através de meios de diferentes densidades, a radiofrequência tem variações de velocidade, estas influem na sua trajetória e na própria propagação.

Quando se trata de projeto, construção de antenas ou análise de propagação, o comprimento de onda tem extrema importância, pois da frequência de operação sairão importantes dados sobre ângulos de partida, altitudes de reflexão e o principal, a distância que se quer atingir.

As antenas, conforme descrito anteriormente, são utilizadas na transmissão e recepção de sinais de ondas de rádio, ou radiofrequência (RF). Ao ar livre esta se propaga praticamente na velocidade da luz com perdas bastante baixas em terreno sem obstáculos, contudo, quando o sinal se propaga em terrenos, materiais ou elementos que interagem entre si eletromagneticamente, as ondas podem ser refletidas, refratadas difratadas ou

absorvidas, também têm sua velocidade de propagação alterada em função do meio.

Quanto ao formalismo matemático, não importa a frequência, os princípios se aplicam uniformemente em todos comprimentos de onda. Mas na parte mecânica, na construção de uma antena propriamente dita, ocorre sempre um diferencial que varia conforme a frequência. Pois ocorrem certas limitações que aumentam as dificuldades quanto menor o comprimento de onda. Assim, a diferença entre a teoria e a prática na construção de antenas se torna maior quanto maiores os elementos variáveis inseridos.

1.4 Propagação de ondas de rádio e parametrização de antenas

Onda de rádio (RF) é uma forma de radiação eletromagnética que possui algumas propriedades que lhe permite se propagar no meio onde se encontra. Por exemplo, espaço aberto, vácuo, gases, elementos sólidos ou líquidos. Estas propriedades são:

- * Intensidade de campo.
- * Polarização.
- * Frequência.
- * Direção de deslocamento.

1.4.1 Intensidade de campo de RF

A intensidade de campo de RF é utilizada para medição de eficiência ou levantamento paramétrico de antenas emisoras, receptoras ou transmissoras-receptoras. Se pode definir como o valor de um vetor num ponto da região ocupada por um campo vetorial. Para radiofrequência é o valor eficaz de campo elétrico, dado em microvolts por metro, esta é produzida num determinado ponto por ondas eletromagnéticas com frequência pré-determinada para possibilitar a leitura.

Para se efetuar a medição de intensidade de campo de determinada frente de onda que se propaga em certo meio, a medida é feita na direção onde se lê o máximo sinal.

1.4.2 Polarização

Para RF, a polarização é o processo de fazer a radiação oscile numa determinada forma, tal que os percursos das vibrações num plano perpendicular ao raio sejam linhas retas, elipses ou círculos, o que constitui respectivamente uma polarização plana, elíptica ou circular.

É a orientação, ou a direção de um vetor elétrico numa onda de RF polarizada linearmente, quando irradiada de uma antena transmissora. Em HF para frequências superiores, (VHF, UHF, SHF), se pode orientar a polarização de antenas de duas formas, polarização horizontal e polarização vertical. Ou seja, quando polarizado horizontalmente, um sinal de RF é captado bastante fraco, ou não é captado por uma antena em polarização vertical e vice-versa, salvo distâncias entre emissor e receptor bastante pequenas.

A polarização de uma antena sempre é tomada em relação ao plano que por ela é enxergado como a terra, ou seja pela posição do vetor campo elétrico. Assim, estando o campo elétrico na horizontal, este estará polarizado

horizontalmente, se na vertical, dir-se-á que o campo é polarizado verticalmente. Um exemplo de polarização vertical de antenas, são as chamadas "monopolos", para estas, é necessária uma referência de terra, ou um "plano de terra", cujas dimensões e formas devem ser tais que propiciem um diagrama de irradiação (Ou recepção) adequado ao maior rendimento possível. Conforme o tipo de propagação ou mesmo da antena utilizada, sua polarização, conforme dito anteriormente, pode ser linear, circular ou elíptica e é o campo elétrico que a determinará.

1.4.3 Freqüência

Em RF, freqüência é o número de ciclos completos por unidade de tempo de uma quantidade periódica como, por exemplo, a RF se propaga pelo espaço, também se pode defini-la como "uma medida do número de ocorrências na repetição de um evento por unidade de tempo", conforme a equação 1.4.3.1:

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

(1.4.3.1)

É expressa em Hertz, é o inverso do período, ou seja, o tempo necessário para a complementação de um ciclo.

1.4.3.1 Espectro de RF

Para efeito de estudo de RF, o espectro de RF é dividido em regiões segundo suas propriedades de propagação, a relação abaixo expressa essas divisões:

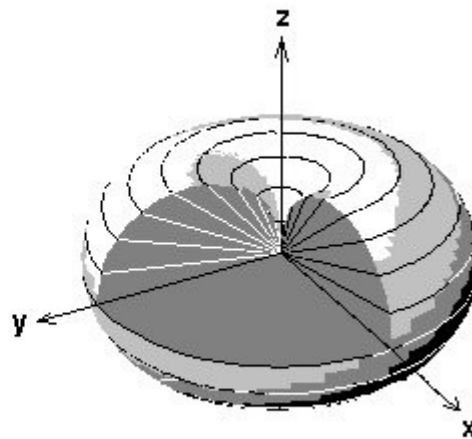
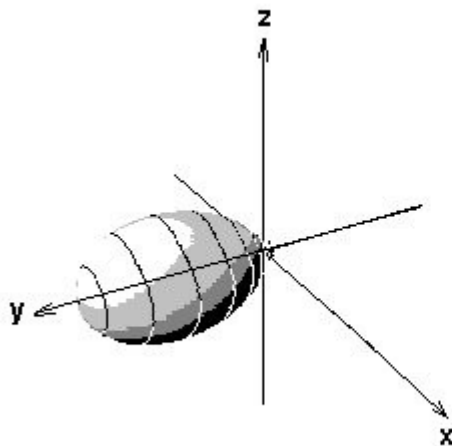
Hz	ELF - Extremely Low Frequency ou Freqüências Extra Baixas	- 3,0	a	30 Hz
Hz	SLF - Super Low Frequency ou Freqüências Super Baixas	- 30 Hz	a	300
kHz	ULF - Ultra Low Frequency ou Freqüências Ultra Baixas	- 300 Hz	a	3,0
kHz	VLF - Very Low Frequency ou Freqüências Muito Baixas	- 3,0 kHz	a	30
kHz	LF - Low Frequency ou Freqüências Baixas	- 30 kHz	a	300
MHz	MF - Medium Frequency ou Freqüências Médias	- 300 kHz	a	3,0
MHz	HF - High Frequency ou Freqüências Altas	- 3,0 MHz	a	30
MHz	VHF - Very High Frequency ou Freqüências Muito Altas	- 30 MHz	a	300
GHz	UHF - Ultra High Frequency ou Freqüências Ultra Altas	- 300 MHz	a	3,0
GHz	SHF - Super High Frequency ou Freqüências Super Altas	- 3,0 GHz	a	30
GHz	EHF - Extremely High Frequency ou Freqüências Extra Altas	- 30 GHz	a	300

1.4.4 Direção de deslocamento

Toda antena transmissora irradia RF, ou emite energia para o ambiente, seja qual for o meio, no caso das antenas utilizadas para a recepção, o caminho é inverso, isto é, elas "captam" a energia eletromagnética.

Quando ocorre a irradiação, a energia pode se propagar de diversas formas, mas sempre se desloca de uma determinada direção para outra, ou seja, o movimento das ondas eletromagnéticas, ou de uma perturbação elétrica súbita sempre ocorre em determinado sentido ou direção de deslocamento, mesmo quando se trata de um irradiador omnidirecional.

O deslocamento sempre será a partir do elemento irradiante, são suas características geométricas que darão forma ao campo emitido ou recebido, pois ao receber o sinal provindo de um sistema de transmissão, a energia recebida possui uma determinada direção. Quando se levanta dados ou quando se projeta uma antena, o termo "radiação padrão" dá a idéia de uma dependência direcional. O "campo próximo" ou campo Fresnel pode ser representado graficamente como um conjunto de variáveis no domínio de uma força de raio constante. O ganho ou ganho direcional pode ser levantado a partir de uma antena sob teste comparada a uma antena padrão. Por exemplo, através de medições de campo próximo se pode levantar o diagrama tridimensional de uma antena dipolo vertical e em seguida de uma antena Yagi. Surgirão assim dois gráficos, que comparados, mostrarão perfeitamente os campos onidirecional do dipolo vertical e da Yagi vertical conforme as figuras 1.4.4.1 e 1.4.4.2.



(c)PY5AAL-2007

Figura 1.4.4.1 Irradiação direcional Figura 1.4.4.2 Irradiação direcional (Fonte Angelo Leithold)

1.5 Propagação das ondas de rádio.

Alguns pesquisadores classificam a propagação das ondas de rádio de duas formas distintas: Ondas terrestres e Ondas espaciais. Embora existam outros tipos e outras nomenclaturas, as citadas acima serão descritas de forma sucinta.

*Onda terrestre: Uma onda terrestre pode ser vista como aquela cujas componentes de uma onda de rádio ordinária que se propagam ponto a ponto, exceptuando-se a propagação troposférica e ionosférica.

A onda terrestre tem componentes diretas, ou de linha de visada e ondas refletidas pela terra, ou objetos físicos entre a antena transmissora e a receptora. Desloca-se pela superfície da Terra e depende desta para se propagar, por fazer parte de seu meio de transmissão.

*Onda espacial: Ondas de rádio que se propagam da mesma forma que as ondas terrestres, contudo são emitidas para o espaço atingindo a ionosfera, sendo após refratadas ou refletidas. Sob algumas condições, as ondas se propagam pelo espaço e são refratadas ou refletidas pela troposfera.

Pelas características de frequência e ângulo de partida, as ondas espaciais são irradiadas "para cima", dependendo do comprimento de onda, podem ser em maior ou menor grau afetadas pela ionosfera.

As ondas espaciais e terrestres podem ser partes da mesma onda de radiofrequência propagada a partir de um mesmo sistema irradiante e podem compostas pelo mesmo comprimento de onda.

Conforme será demonstrado pormenorizadamente, e conforme as figuras 1.4.4.1 e 1.4.4.2, as ondas de radiofrequência deixam a antena transmissora, ou atingem a receptora em forma de "camadas" que se propagam pelo espaço, estas tem a forma hemisférica, e podem ser enxergadas como "frentes de onda". Assim, algumas partes do sinal podem realmente ser propagadas rentes à terra e ser captadas pela antena receptora. Outras partes do mesmo sinal, podem se propagar em direção ao espaço e se perder no espaço exterior, dependendo do comprimento de onda, podem ter alterado seu ângulo de propagação e sofrer refração (Lei de Snell), sendo refrações múltiplas, podem sofrer uma pécie de reflexão e retornar à superfície da terra.

Dependendo da hora do dia, as ondas de rádio têm grande parte de si propagadas como ondas terrestres, isto é, são captadas apenas localmente. Ao cair da noite, dependendo das condições ionosféricas, estas passarão a se propagar também para a ionosfera, e refletidas, serão captadas à longas distâncias.

1.5.1 Álgebra Vetorial

Para dar continuidade conceitual, serão postas aqui algumas relações básicas de álgebra dos vetores, isto se deve pelo fato do acompanhamento dos conceitos que serão postos mais adiante.

1.5.2 Algumas relações importantes para dar seguimento às leituras adiante.

Operações vetoriais em sistemas coordenados usuais

$$\mathbf{A} \pm \mathbf{B} = (A_1 \pm B_1)\hat{\mathbf{a}}_1 + (A_2 \pm B_2)\hat{\mathbf{a}}_2 + (A_3 \pm B_3)\hat{\mathbf{a}}_3 \quad (1)$$

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{B} = |\mathbf{A}| |\mathbf{B}| \cos \theta = A_1 B_1 + A_2 B_2 + A_3 B_3 \quad (2)$$

$$\mathbf{A} \times \mathbf{B} = \hat{\mathbf{a}}_1(A_2 B_3 - A_3 B_2) + \hat{\mathbf{a}}_2(A_3 B_1 - A_1 B_3) + \hat{\mathbf{a}}_3(A_1 B_2 - A_2 B_1) \quad (3)$$

$$|\mathbf{A} \times \mathbf{B}| = |\mathbf{A}| |\mathbf{B}| \sin \theta \quad (4)$$

$$\mathbf{A} \cdot (\mathbf{B} \times \mathbf{C}) = \mathbf{C} \cdot (\mathbf{A} \times \mathbf{B}) = \mathbf{B} \cdot (\mathbf{C} \times \mathbf{A}) \quad (5)$$

$$\mathbf{A} \times (\mathbf{B} \times \mathbf{C}) = (\mathbf{A} \cdot \mathbf{C})\mathbf{B} - (\mathbf{A} \cdot \mathbf{B})\mathbf{C} \quad (6)$$

$$\mathbf{A} \times \mathbf{B} = -\mathbf{B} \times \mathbf{A} \quad (7)$$

$$(\mathbf{A} \times \mathbf{B}) \cdot (\mathbf{C} \times \mathbf{D}) = \mathbf{A} \cdot [\mathbf{B} \times (\mathbf{C} \times \mathbf{D})] = (\mathbf{A} \cdot \mathbf{C})(\mathbf{B} \cdot \mathbf{D}) - (\mathbf{A} \cdot \mathbf{D})(\mathbf{B} \cdot \mathbf{C}) \quad (8)$$

$$(\mathbf{A} \times \mathbf{B}) \times (\mathbf{C} \times \mathbf{D}) = [(\mathbf{A} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{D}]\mathbf{C} - [(\mathbf{A} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{C}]\mathbf{D} \quad (9)$$

Coordenadas Retangulares, e Coordenadas Cilíndricas

Coordenadas Retangulares (x, y, z) :

$$\text{grad } \Phi = \nabla \Phi = \hat{\mathbf{a}}_x \frac{\partial \Phi}{\partial x} + \hat{\mathbf{a}}_y \frac{\partial \Phi}{\partial y} + \hat{\mathbf{a}}_z \frac{\partial \Phi}{\partial z} \quad (10)$$

$$\text{div } \mathbf{A} = \nabla \cdot \mathbf{A} = \frac{\partial A_x}{\partial x} + \frac{\partial A_y}{\partial y} + \frac{\partial A_z}{\partial z} \quad (11)$$

$$\text{rot } \mathbf{A} = \nabla \times \mathbf{A} = \hat{\mathbf{a}}_x \left(\frac{\partial A_z}{\partial y} - \frac{\partial A_y}{\partial z} \right) + \hat{\mathbf{a}}_y \left(\frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \hat{\mathbf{a}}_z \left(\frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y} \right) \quad (12)$$

$$\nabla^2 \Phi = \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \Phi \quad (13)$$

$$\nabla^2 \mathbf{A} = \hat{\mathbf{a}}_x \nabla^2 A_x + \hat{\mathbf{a}}_y \nabla^2 A_y + \hat{\mathbf{a}}_z \nabla^2 A_z \quad (14)$$

Coordenadas Cilíndricas (ρ, φ, z) :

$$\nabla \Phi = \hat{\mathbf{a}}_\rho \frac{\partial \Phi}{\partial \rho} + \hat{\mathbf{a}}_\varphi \frac{1}{\rho} \frac{\partial \Phi}{\partial \varphi} + \hat{\mathbf{a}}_z \frac{\partial \Phi}{\partial z} \quad (15)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{A} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} (\rho A_\rho) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial A_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{\partial A_z}{\partial z} \quad (16)$$

$$\nabla \times \mathbf{A} = \hat{\mathbf{a}}_\rho \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial A_z}{\partial \varphi} - \frac{\partial A_\varphi}{\partial z} \right) + \hat{\mathbf{a}}_\varphi \left(\frac{\partial A_\rho}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial \rho} \right) + \hat{\mathbf{a}}_z \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial (\rho A_\varphi)}{\partial \rho} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial A_\rho}{\partial \varphi} \right) \quad (17)$$

$$\nabla^2 \Phi = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho \frac{\partial \Phi}{\partial \rho} \right) + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} \quad (18)$$

$$\nabla^2 \mathbf{A} = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{A}) - \nabla \times \nabla \times \mathbf{A} \quad (19)$$

Observar que $\nabla^2 \mathbf{A} \neq \hat{\mathbf{a}}_\rho \nabla^2 A_\rho + \hat{\mathbf{a}}_\varphi \nabla^2 A_\varphi + \hat{\mathbf{a}}_z \nabla^2 A_z$.

Coordenadas Esféricas (r, θ, φ) :

$$\nabla\Phi = \hat{\mathbf{a}}_r \frac{\partial\Phi}{\partial r} + \hat{\mathbf{a}}_\theta \frac{1}{r} \frac{\partial\Phi}{\partial\theta} + \hat{\mathbf{a}}_\varphi \frac{1}{r \sin\theta} \frac{\partial\Phi}{\partial\varphi} \quad (20)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{A} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 A_r) + \frac{1}{r \sin\theta} \frac{\partial}{\partial\theta} (\sin\theta A_\theta) + \frac{1}{r \sin\theta} \frac{\partial A_\varphi}{\partial\varphi} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \nabla \times \mathbf{A} = \frac{\hat{\mathbf{a}}_r}{r \sin\theta} \left[\frac{\partial}{\partial\theta} (A_\varphi \sin\theta) - \frac{\partial A_\theta}{\partial\varphi} \right] + \frac{\hat{\mathbf{a}}_\theta}{r} \left[\frac{1}{\sin\theta} \frac{\partial A_r}{\partial\varphi} - \frac{\partial}{\partial r} (r A_\varphi) \right] + \\ + \frac{\hat{\mathbf{a}}_\varphi}{r} \left[\frac{\partial}{\partial r} (r A_\theta) - \frac{\partial A_r}{\partial\theta} \right] \end{aligned} \quad (22)$$

$$\nabla^2\Phi = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial\Phi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin\theta} \frac{\partial}{\partial\theta} \left(\sin\theta \frac{\partial\Phi}{\partial\theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2\theta} \frac{\partial^2\Phi}{\partial\varphi^2} \quad (23)$$

$$\nabla^2\mathbf{A} = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{A}) - \nabla \times \nabla \times \mathbf{A} \quad (24)$$

Identidades Vetoriais

$$\nabla(\Phi\Psi) = \Psi\nabla\Phi + \Phi\nabla\Psi \quad (25)$$

$$\nabla \cdot \nabla\Phi = \nabla^2\Phi \quad (26)$$

$$\nabla \cdot (\Phi\mathbf{A}) = \mathbf{A} \cdot \nabla\Phi + \Phi\nabla \cdot \mathbf{A} \quad (27)$$

$$\nabla^2(\Phi\Psi) = \Psi\nabla^2\Phi + \Phi\nabla^2\Psi + 2\nabla\Phi \cdot \nabla\Psi \quad (28)$$

$$\nabla \cdot (\mathbf{A} \times \mathbf{B}) = (\nabla \times \mathbf{A}) \cdot \mathbf{B} - (\nabla \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{A} \quad (29)$$

$$\nabla \times (\Phi\mathbf{A}) = \nabla\Phi \times \mathbf{A} + \Phi\nabla \times \mathbf{A} \quad (30)$$

$$\nabla \times (\mathbf{A} \times \mathbf{B}) = \mathbf{A}\nabla \cdot \mathbf{B} - \mathbf{B}\nabla \cdot \mathbf{A} + (\mathbf{B} \cdot \nabla)\mathbf{A} - (\mathbf{A} \cdot \nabla)\mathbf{B} \quad (31)$$

$$\nabla \cdot \nabla \times \mathbf{A} = 0 \quad (32)$$

$$\nabla \times \nabla\Phi = 0 \quad (33)$$

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{A} = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{A}) - \nabla^2\mathbf{A} \quad (34)$$

Teorema de Gauss

$$\int_V \nabla \cdot \mathbf{A} \, dV = \oint_S \mathbf{A} \cdot d\mathbf{S} \quad (35)$$

Teorema de Stokes

$$\int_S \nabla \times \mathbf{A} \cdot d\mathbf{S} = \oint_C \mathbf{A} \cdot d\mathbf{l} \quad (36)$$

Identidades de Green Escalares

$$\int_V (\nabla\Phi \cdot \nabla\Psi + \Psi\nabla^2\Phi) dV = \oint_S \Psi\nabla\Phi \cdot d\mathbf{S} \quad (37)$$

$$\int_V (\Psi\nabla^2\Psi - \Phi\nabla^2\Phi) dV = \oint_S (\Psi\nabla\Phi - \Phi\nabla\Psi) \cdot d\mathbf{S} \quad (38)$$

Identidades de Green Vetoriais

$$\int_V \nabla \cdot (\mathbf{A} \times \nabla \times \mathbf{B}) dV = \int_V [(\nabla \times \mathbf{A}) \cdot (\nabla \times \mathbf{B}) - \mathbf{A} \cdot \nabla \times \nabla \times \mathbf{B}] dV = \oint_S \mathbf{A} \times (\nabla \times \mathbf{B}) \cdot d\mathbf{S} \quad (39)$$

$$\int_V (\mathbf{B} \cdot \nabla \times \nabla \times \mathbf{A} - \mathbf{A} \cdot \nabla \times \nabla \times \mathbf{B}) dV = \oint_S [\mathbf{A} \times (\nabla \times \mathbf{B}) - \mathbf{B} \times (\nabla \times \mathbf{A})] \cdot d\mathbf{S} \quad (40)$$

Outras Identidades

$$\int_V \nabla\Phi dV = \oint_S \Phi d\mathbf{S} \quad (41)$$

$$\int_V \nabla \times \mathbf{A} dV = \oint_S \mathbf{n} \times \mathbf{A} dS \quad d\mathbf{S} = \mathbf{n}dS \quad (42)$$

$$\int_S \mathbf{n} \times \nabla\Phi dS = \oint_C \Phi d\mathbf{l} \quad (43)$$

$$\nabla^2 \left(\frac{1}{R} \right) = -4\pi\delta^3(\mathbf{R}) \quad (44)$$

$\delta^3(\mathbf{R}) = \delta(x-x')\delta(y-y')\delta(z-z')$ delta de Dirac em 3 dimensões e $R = |\mathbf{R}| = |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|$

$$\nabla \cdot \mathbf{R} = 3 \quad \nabla \times \left(\frac{\mathbf{R}}{R} \right) = 0 \quad (45)$$

$$\nabla(R) = \frac{\mathbf{R}}{R} \quad (46)$$

$$\nabla'(R) = -\frac{\mathbf{R}}{R} \quad (47)$$

$$\nabla \left(\frac{1}{R} \right) = -\frac{\mathbf{R}}{R^3} \quad \nabla' \left(\frac{1}{R} \right) = \frac{\mathbf{R}}{R^3} \quad (48)$$

∇ opera em \mathbf{r} e ∇' em \mathbf{r}' , $\mathbf{R} = \mathbf{r} - \mathbf{r}'$ vetores letras em negrito
escalares letras gregas.