

INDICE

Introdução.....	01
Capítulo 1 – Conceitos e Definições de Antenas.....	02
Capítulo 2 – Tipos de Antenas e suas propriedades.....	16
Capítulo 3 – Arranjo de Antenas.....	28
Capítulo 4 – Tilt e Null Fill.....	41
Capítulo 5 – Montagem da Antena na torre.....	44
Capítulo 6 – Deformação de Diagrama / Ecos.....	47
Capítulo 7 – Critérios de Instalação.....	56
Capítulo 8 – Critérios de Especificação.....	63
Capítulo 9 – Sistemas Radiantes para DTV.....	65
Lista das Figuras.....	74

INTRODUÇÃO

A agenda do curso está dividida em 10 capítulos que pretendem abordar de maneira simples, objetiva e sem formulações matemáticas complexas os principais conceitos necessários para uma melhor compreensão prática dos fenômenos associados ao funcionamento de antenas.

A abordagem deste curso é de natureza puramente aplicada e direcionada aos aspectos relacionados à especificação, seleção e instalação/operação de antenas para transmissão de sinais de som e imagem, quer dizer, antenas para radiodifusão dos serviços de FM e Televisão.

O curso foi concebido com base na observação das dúvidas conceituais mais freqüentes de profissionais usuários de antenas e na constatação da carência de um programa atualizado de treinamento em sistemas de antenas de transmissão, razão do título.

CONCEITOS E DEFINIÇÕES DE ANTENAS

Ocorre na prática cotidiana de implementação de sistemas de transmissão uma situação muito similar àquela que muitos de nós, engenheiros ou técnicos, já passamos algum dia durante um projeto que desenvolvemos aonde, ao final, constatamos que uma determinada função, supostamente estanque e de pouca importância no início do projeto revelou-se no final muito mais complexa e o que é pior, determinante do funcionamento do nosso equipamento; quem já não deve ter “sofrido” algum dia com problemas de fonte de alimentação? e posteriormente se convencido que o projeto deveria ter começado por esta função supostamente “banal” !.

A American Radio Relay League, associação Norte-Americana de rádio amadores, chama a atenção para este assunto escrevendo na contracapa de seu clássico “Handbook of Antennas” a frase:

- “uma estação é tanto eficiente quanto a sua antena”

Nesta frase, a palavra eficiência traduz a capacidade da estação estabelecer comunicação com maior ou menor grau de qualidade, de onde se conclui que a antena é um dos elementos que determina a qualidade da estação.

O dimensionamento da qualidade ou, neste contexto, área de cobertura de uma estação é determinado na fase de projeto pelo parâmetro Potência ERP (ERP= Effective Radiated Power), que é dado pelo produto da potência do transmissor, Ganho de potência da antena e eficiência do sistema de transmissão (retomaremos a questão da eficiência como aparece nesta equação em uma figura posterior). Verifica-se de forma bastante simples portanto que a antena contribui diretamente na magnitude da área de cobertura.

Por outro lado a confiabilidade de uma estação isto é, o período de tempo em que o serviço está disponível para os telespectadores é, se não o principal, um dos fatores determinantes do sucesso comercial da operação e é completamente determinada pela confiabilidade do transmissor e confiabilidade da antena.

Questão ?

“Uma estação é tanto eficiente quanto a sua antena”- arrl



$$\text{ERP} = \text{Potência Tx} * \text{Ganho Antena} *$$

$$\text{MTBF Tx} = F (\text{transmissor}, \text{antena})$$

Figura 1 - Questão

Levantamos este ponto para mais uma vez chamar a atenção ao fato de que muitas vezes se realiza um investimento maciço unicamente na redundância do equipamento transmissor, ignorando-se, ou pelo menos dando-se menor importância à redundância da antena, quando bem sabemos que, na realidade, de pouco irão adiantar dois transmissores operando quando na ocorrência de falha da antena.

Em suma, a questão chave ao redor de um sistema de transmissão para que o mesmo alcance o sucesso pretendido, é simplesmente a abordagem correta e prudente (sob o ponto de vista de engenharia) de não se desprezar a antena de transmissão e relegar a um segundo plano a sua especificação e implementação neste sistema.

Esperamos que estas colocações, embora simples e objetivas, tenham conseguido ilustrar de maneira clara o grau de relevância e responsabilidade da antena em um sistema de transmissão profissional.

- *Antena*

Elemento de um sistema de transmissão ou de recepção designado para radiar ou captar ondas eletromagnéticas.

Transdutor de ondas eletromagnéticas entre um meio confinado e o espaço livre.

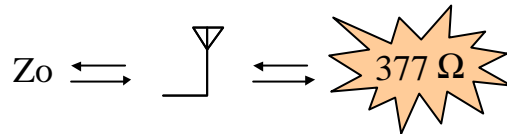


Figura 2 - Antena

Como definir uma antena de forma intuitiva e descomplicada ?

Se recorrermos ao dicionário (Aurélio) lê-se:

Def.1. Parte de um transmissor cujo potencial varia rapidamente, irradiando para o espaço ondas eletromagnéticas;

Def.2. Parte de um receptor de rádio que capta a energia eletromagnética, introduzindo-a no aparelho sob forma de impulsos elétricos;

Def.3. Estrutura metálica, fio ou conjunto de fios com as mesmas funções na Def.1 e Def.2.

Por outro lado, definir uma antena sob o ponto de vista da física associada ao seu funcionamento e do modelo matemático que o descreve representa uma ciência a parte e foge portanto do escopo de nossa abordagem.

Numa visão mais aplicada e compatível com os objetivos deste texto, o conceito que entendemos ser mais adequado para antena é aquele associado como sendo o elemento pertencente a um sistema de transmissão e/ou recepção de sinais que tem como função radiar /captar ondas eletromagnéticas, adaptando a energia (contida nas ondas eletromagnéticas) entre um meio confinado (uma linha de transmissão) e um meio não confinado (espaço livre ou éter).

Nesta linha de raciocínio, pode-se facilmente avançar no conceito e afirmar que uma antena nada mais é (sem medo de simplificar) do que um transdutor de ondas eletromagnéticas entre meios com propriedades distintas de propagação de energia. Uma antena adapta portanto a impedância entre a linha coaxial de transmissão de saída de um TX (50 ohms) e a impedância do espaço livre ($120 \cdot \pi$ ou 377 ohms).

A maneira como esta adaptação de energia acontece define propriedades fundamentais das antenas pois:

- pode-se dar de forma controlada ao longo do espaço ao redor da antena (de onde surge o conceito de diagrama de radiação tridimensional);
- pode-se dar com maior ou menor eficiência em uma dada direção comparativamente à uma antena de referência (de onde surge o conceito de ganho);
- pode-se dar numa faixa de frequência maior ou menor (de onde surge o conceito de largura de faixa);
- pode-se dar com maior ou menor perda de energia (de onde surge o conceito de VSWR);
- pode-se dar em uma determinada orientação de propagação do campo elétrico em detrimento de outra orientação (de onde surge o conceito de polarização)

Estes conceitos fundamentais de antenas , bem como outros serão elaborados nas próximas figuras.

- *Diagrama de Radiação*

É a representação gráfica da distribuição espacial das propriedades de radiação da antena :

➔ Potência, Intensidade de campo ,Fase, Polarização

Emprega-se :

- Formato polar ou Formato retangular
- Escala linear (valor absoluto) ou logarítmica (em dB)

Figura 3 – Definição de Diagrama de Radiação

Talvez a principal propriedade de uma antena que desejamos conhecer / especificar numa primeira análise seja o seu diagrama de radiação, pois é a propriedade com um apelo intuitivo mais imediato e que traduz o comportamento da antena quanto à sua capacidade de distribuir espacialmente (ao seu redor) a energia aplicada em seus terminais de entrada.

Genericamente, diagrama de radiação é a representação gráfica da distribuição espacial das propriedades de radiação da antena, tomadas sobre uma superfície imaginária no espaço chamada de “esfera de radiação” onde a antena em análise está hipoteticamente disposta no seu centro.

Quais seriam portanto as propriedades de radiação de uma antena que estamos interessados em caracterizar, ou melhor, representar pôr intermédio de diagramas de radiação ? São elas (principais):

- Potência
- Intensidade de campo
- Fase
- Polarização

Logo, para cada uma das propriedades acima podemos associar um diagrama de radiação espacial específico, também chamado de diagrama de radiação tridimensional (3D), que represente graficamente como a potência, intensidade de campo, fase e polarização se distribui ao redor da antena.

Para fins de projeto e com maior aplicação na prática, restringe-se entretanto a publicação apenas de diagramas de radiação de potência e de intensidade de campo, representados graficamente no formato polar ou no formato retangular e utilizando escala com passo linear ou escala com passo em dB (em figuras posteriores serão evidenciadas as diferenças entre utilizar escala com passo linear e escala com passo em dB bem como as diferenças entre utilizar o formato polar ou retangular).

- *Diagrama de Radiação*

Na prática especificam-se apenas os cortes principais do diagrama 3D da antena :

- Diagrama de Azimute \equiv horizontal [θ fixo, Φ variável]
- Diagrama de Elevação \equiv vertical [Φ fixo, θ variável]

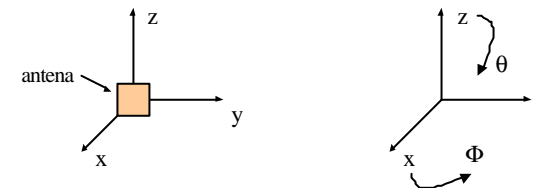


Figura 4 – Sistema de coordenadas do Diagrama de Radiação

Da figura anterior pode ter ficado a dúvida do que são exatamente os formatos polar e retangular, pois afirmamos que genericamente o diagrama de radiação é determinado sobre uma esfera que envolve a antena, portanto fisicamente teremos uma distribuição de energia espacial que precisamos traduzir numa representação gráfica inteligível para fins de projeto.

O que ocorre na prática é uma simplificação, isto é, especificam-se apenas os cortes (ou fatias da esfera de radiação) principais do diagrama 3D da antena, estes cortes principais são os cortes de azimute (horizontal) e os cortes de elevação (vertical) os quais efetivamente são empregados em projeto.

Observando a Fig. 4, se imaginarmos a antena posicionada no centro de um sistema de coordenadas x,y,z onde o eixo x está perpendicular ao plano da figura (portanto um eixo saindo da figura em nossa direção), pode-se definir dois cortes principais na esfera imaginária que envolve a antena e associar cada um destes cortes ao sistema de coordenadas x,y,z , quais sejam :

- Corte de azimute = fatia da esfera de radiação onde as propriedades de radiação da antena são verificadas no plano x , y ou , intuitivamente, no plano horizontal;
- Corte de elevação = fatia da esfera de radiação onde as propriedades de radiação da antena são verificadas no plano z , y ou , intuitivamente, no plano vertical.

Mais precisamente, se chamamos theta (θ) o ângulo tomado entre o eixo z e o vetor formado da origem do sistema de coordenadas x,y,z até um ponto qualquer sobre a esfera de radiação e chamamos phi (ϕ) o ângulo tomado entre o eixo x e o vetor formado da origem do sistema de coordenadas x,y,z até um ponto qualquer sobre a esfera de radiação, podemos ampliar a definição do parágrafo anterior e afirmar que o corte de azimute é qualquer corte da esfera de radiação onde o ângulo theta permanece fixo (normalmente em 90 graus) e o ângulo phi varia, similarmente, podemos afirmar que o corte de elevação é qualquer corte da esfera de radiação onde o ângulo phi permanece fixo (normalmente em 0 graus) e o ângulo theta varia.

Toda esta nomenclatura e definições apresentado anteriormente não deve atrapalhar o conceito de que, na prática, a especificação de diagrama que se faz de uma antena está restringindo a descrição das suas propriedades de radiação aos planos ou cortes principais de análise utilizados em projeto, quais sejam: os planos horizontal e vertical, portanto deve estar sólido o conceito de que o diagrama de radiação horizontal de uma antena é o diagrama do corte de azimute tomado do diagrama de radiação 3D, bem como o diagrama de radiação vertical de uma antena é o diagrama do corte de elevação tomado do diagrama de radiação 3D.

Este entendimento leva à conclusão imediata de que os formatos de representação polar e retangular que mencionamos no início desta figura nada mais são do que variações da representação gráfica 2D ou seja , no “plano do papel”, dos diagramas de radiação horizontal e vertical da antena.

Os diagramas da Fig. 5 exemplificam.

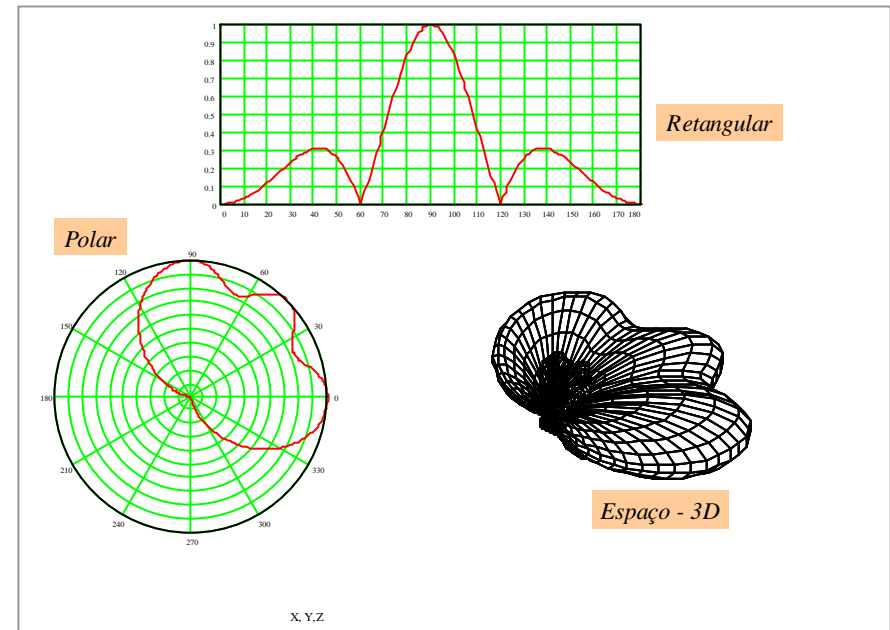


Figura 5 – Tipos de Diagrama de Radiação

Nesta figura temos, na parte superior ao centro, um diagrama representado no formato retangular, onde o eixo vertical (abscissa) indica a intensidade de campo normalizada [0,1] e o eixo horizontal (ordenada) indica o setor angular de análise.

Observando este diagrama verificamos que, por exemplo para o ângulo 90 graus a intensidade de campo é máxima (igual a 1) e para os ângulos 60 e 120 graus a intensidade de campo é nula (igual a 0).

Na parte inferior a esquerda temos agora um outro diagrama representado no formato polar, onde as linhas radiais (tomadas do centro da circunferência até o círculo externo) representam o ângulo de

análise e o raio associado (ponto de intercessão da radial com o diagrama) representa a intensidade de campo normalizada [0,1] sendo 1 o valor da intensidade de campo associada ao círculo externo

Observando este diagrama verificamos que, por exemplo nas radiais 0,45 e 90 graus tem-se intensidade de campo máxima e que para a radial 300 graus a intensidade de campo é apenas 0.2.

Se agora afirmarmos que o diagrama retangular representa o diagrama de radiação de elevação e o diagrama polar representa o diagrama de radiação de azimute de uma mesma antena, facilmente iremos reconhecer estes dois diagramas anteriores como cortes do diagrama 3D desta antena mostrado na parte inferior a direita da figura.

Embora o diagrama de radiação de qualquer antena seja fisicamente um diagrama espacial, a representação pôr intermédio dos dois cortes principais :

- azimute (também chamado de diagrama horizontal)
- elevação (também chamado de diagrama vertical)
- deste diagrama espacial traduzem com bastante fidelidade o comportamento das propriedades de radiação da antena, mas é sempre importante lembrar, tratam-se de simplificações necessárias e impostas para fins de projeto.

Qualquer análise mais minuciosa ou completa que se deseje operar sobre as propriedades de radiação de uma antena deve contemplar as propriedades do seu diagrama 3D, não se deve concluir portanto que a antena estará completamente caracterizada quanto ao seu diagrama de radiação analisando-se somente os seus cortes principais.

Qualquer antena pode ser classificada e rapidamente caracterizada, tomando-se como base somente as propriedades do seu diagrama de radiação, em duas categorias bem distintas de funcionamento quais sejam:

Antenas Direcionais e Antenas Ominidirecionais.

As definições são auto-explicativas, por direcional subentende-se aquela antena capaz de radiar / receber ondas eletromagnéticas com eficiência variável em função da direção; por omnidirecional subentende-se a antena que não é direcional.

• *Diagrama de Radiação*

Antena Direcional : tem a capacidade de irradiar / receber ondas eletromagnéticas com maior ou menor eficiência em função da direção.

Antena Ominidirecional : caso particular da antena direcional, onde tem-se comportamento direcional em apenas um dos cortes de azimute ou de elevação.

Ex: Dipolo

Figura 6 – Classificação de Diagrama de Radiação

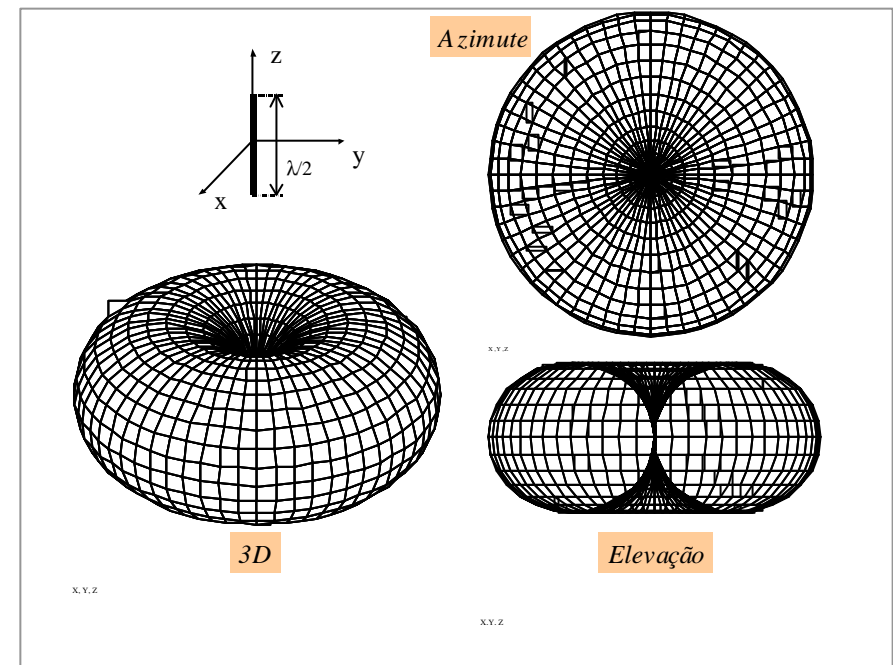


Figura 7 – Exemplo de Diagrama de Radiação

Na prática entretanto, uma antena omnidirecional será, via de regra, direcional em um dos seus cortes, quer seja ele o corte de azimute ou de elevação, pois se a antena fosse omnidirecional em ambos os cortes estaria se aproximando de um radiador ideal, também denominado isotrópico, o qual não é realizável (em figuras posteriores será retomado o conceito do radiador ideal ou isotrópico).

Como exemplo de uma antena que, de acordo com a sua utilização, pode ser classificada como direcional ou omnidirecional, tomemos o dipolo.

Posicionando o dipolo sobre o sistema de coordenadas x,y,z onde o dipolo encontra-se sobre o eixo z , observando o diagrama 3D e recorrendo as definições anteriores dos cortes principais do diagrama 3D (Fig. 4) de uma antena podemos afirmar:

1. Quanto ao corte de Azimute (ou diagrama de radiação horizontal) = o corte de azimute é obtido tomando-se uma “fatia” do diagrama 3D paralela ao plano xy do sistema de coordenadas x,y,z ; esta fatia está representada no canto superior direito da figura e notadamente verifica-se tratar de um diagrama omnidirecional (mesma intensidade de campo em todas as direções).
2. Quanto ao corte de Elevação (ou diagrama de radiação vertical) = o corte de elevação é obtido tomando-se uma fatia do diagrama 3D paralela ao eixo zy (o eixo zx também poderia ser utilizado) do sistema de coordenadas x,y,z ; esta fatia está representada no canto inferior direito da figura e notadamente verifica-se tratar de um diagrama direcional (intensidade de campo nula sobre o eixo z).

Se provocássemos uma rotação de 90 graus no dipolo, isto é, ele estivesse posicionado sobre o eixo x , o diagrama de azimute seria direcional e o diagrama de elevação seria omnidirecional.

Na prática o uso do termo omnidirecional não requer que a intensidade de campo seja constante ao redor da antena, aceita-se e classifica-se o diagrama de uma antena como omnidirecional se a variação de intensidade de campo for menor do que 3 dB (no caso de empregar escala linear e intensidade de campo normalizada, isto significa aceitar a variação do diagrama entre os valores 1 e 0.7).

Qualquer que seja o diagrama de radiação de uma antena que se pretenda analisar / especificar, quer seja ele o diagrama horizontal ou vertical, sempre é possível identificar e/ou classificar os lóbulos de radiação deste diagrama que nada mais são do que partes do próprio diagrama com características específicas, senão vejamos.

A Fig. 8 mostra um diagrama representado em formato retangular (não importa saber se este diagrama é horizontal ou vertical), nota-se neste diagrama partes bem características e representativas das propriedades de radiação da antena, os lóbulos, como são assim chamadas estas partes do diagrama são classificados em:

- **Lóbulo principal:** define o ângulo ou setor também chamado de meia potência, pois é neste lóbulo onde a antena irá concentrar a maior parte de sua energia (se empregado intensidade de campo normalizada e escala linear o ângulo de meia potência corresponde ao arco onde o campo é maior ou igual a 0.707 ou $0.707 \cdot 0.707 = 0.5$ no caso de potência).
- **Lóbulos secundários:** por exclusão, são os demais lóbulos que não o principal, a importância dos lóbulos secundários é verificar como a antena está distribuindo a energia ao seu redor fora da área de principal interesse de cobertura, é útil para a determinação dos nulos ou regiões do diagrama onde se terá intensidade de campo reduzida.
- **Lóbulo traseiro:** é o lóbulo secundário posicionado nas costas ou na direção oposta do lóbulo principal da antena, define o que se denomina de relação frente-costa da antena, que é uma medida útil para se saber da capacidade de “isolamento” da antena quando operando no modo de recepção, ou da sua direcionalidade quando operando no modo de transmissão.

A extração destes parâmetros simples de um diagrama de radiação permite melhor entender a sua aplicação bem como ajuda bastante na especificação preliminar de uma antena quando não se dispões de uma idéia clara e completamente especificada do tipo de diagrama pretendido.

• *Diagrama de Radiação*

As várias partes de um diagrama de radiação são usualmente chamadas de lóbulos :

- lóbulo principal - define largura de meia potência
- lóbulo(s) secundário(s) - define largura entre nulos
- lóbulo traseiro - define relação frente costa

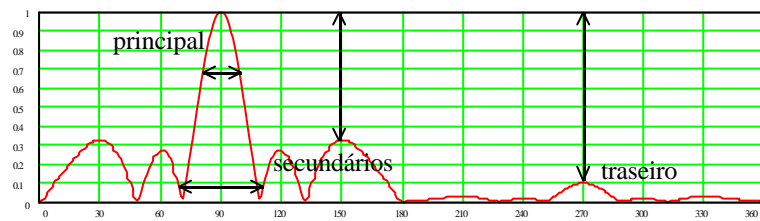


Figura 8 –Partes do Diagrama de Radiação

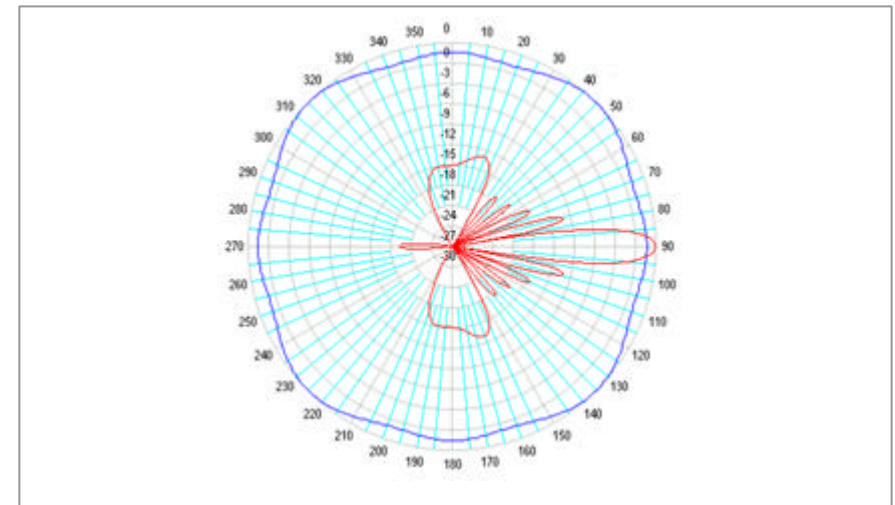


Figura 10 – Diagrama de Radiação escala 3 dB / div

Nestas figuras o diagrama em vermelho do tipo direcional representa o diagrama vertical (corte de elevação) e o diagrama em azul do tipo omnidirecional representa o diagrama horizontal (corte de azimute) de uma mesma antena , ambos diagramas representativos da intensidade de campo normalizada.

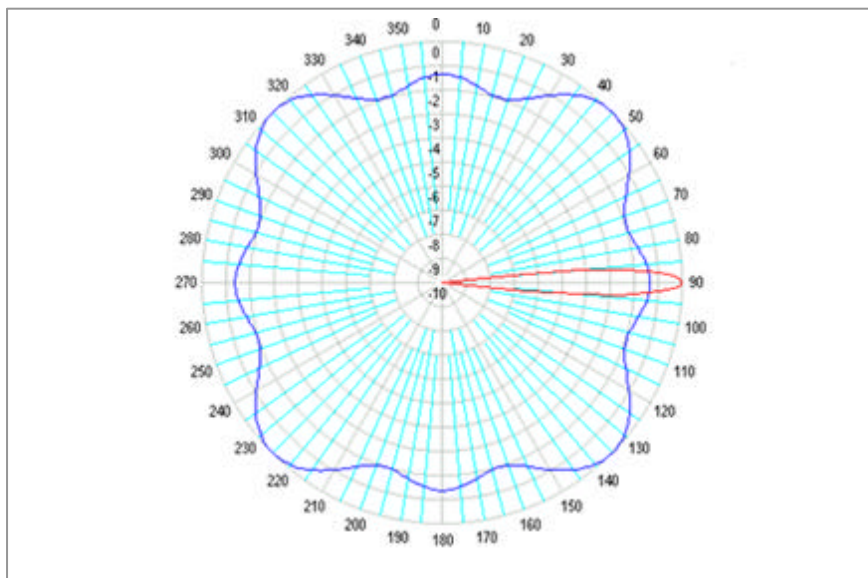


Figura 9 – Diagrama de Radiação escala 1 dB / div

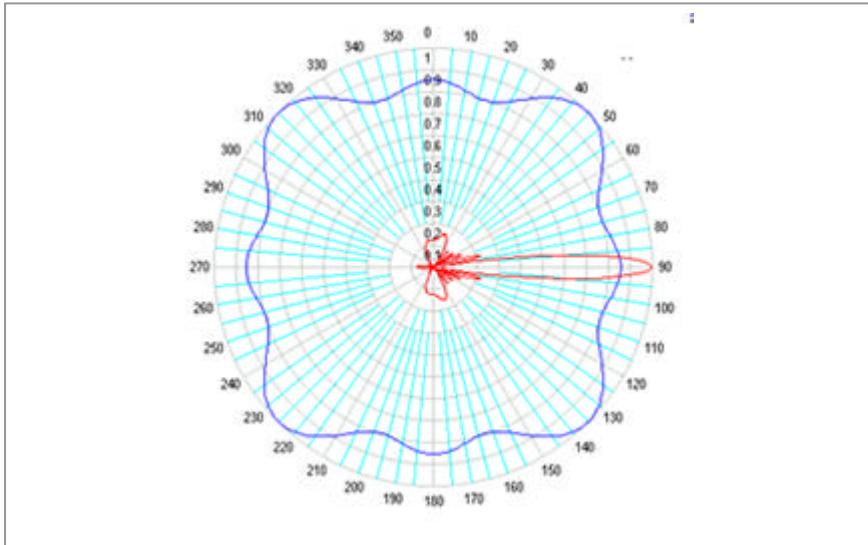


Figura 11 – Diagrama de Radiação escala linear

Na Fig. 9 a escala apresenta passo de 1 dB/div., não permitindo visibilidade dos lóbulos secundários do diagrama vertical e realçando a “circularidade”, menor do que 3 dB, do diagrama horizontal.

Na Fig. 10 a escala apresenta passo de 3 dB/div., onde os lóbulos secundários do diagrama vertical ficaram evidenciados e as propriedades deste diagrama tais como ângulo de meia potência e relação frente costa podem ser extraídas. Neste caso o diagrama horizontal aparenta ter menor “circularidade” do que na figura anterior, mas trata-se do mesmo diagrama apenas representado numa escala com maior passo.

Na Fig. 11 a escala varia de 0 até 1 com passo 0.1/div., é uma escala linear de valores de intensidade de campo e normalmente empregada em projetos.

• *Ganho Diretivo*

A capacidade de uma antena em concentrar energia eletromagnética em uma dada direção é definida numericamente pelo parâmetro Ganho Diretivo.

Ganho Diretivo é uma medida relativa isto é, entre a antena em análise e uma antena de referência:

corneta
dipolo
isotrópico

Figura 12 – Ganho diretivo

O conceito de ganho de uma antena deve ser desenvolvido a partir da premissa de que, à luz do princípio da conservação de energia, uma antena não “produz” energia e portanto não pode ser capaz de provocar amplificação ou ganho no sinal aplicado aos seus terminais, como habitualmente estamos acostumados a caracterizar estruturas eletrônicas ativas tais como amplificadores de sinal.

Em se tratando de estrutura passiva (não estamos interessados neste texto em analisar e nem estender o conceito de ganho à família de antenas ativas i.e. antena + amplificador acoplado, recentemente comuns no mercado de soluções wireless para comunicação pessoal) uma antena opera a energia contida nas ondas eletromagnéticas atuando simplesmente como um transdutor, sendo portanto o seu ganho um conceito que deve ser desenvolvido em termos relativos e não em termos absolutos.

Para definir o parâmetro Ganho de uma antena inicialmente é necessário compreender o que seja Ganho Diretivo, que nada mais é do que a capacidade de uma antena em direcionar ou concentrar energia numa dada direção do espaço comparativamente a uma outra antena de referência que pode ser, por exemplo, um dipolo, uma corneta ou um isotrópico.

Pois bem, comparar o quanto uma antena concentra energia numa dada direção relativamente a outra antena (ambas com a mesma excitação) é criar a situação de relativismo que mencionamos anteriormente, portanto surge daí a métrica desejada, i.e. um número que define esta relação entre as duas antenas e que portanto é o valor do Ganho Diretivo pretendido para caracterizar a antena em análise.

O fato de ser a antena de referência uma corneta justifica-se para quando se quer apresentar o ganho diretivo da antena em análise na faixa de Micro Ondas onde a antena tipo corneta é usualmente utilizada, o emprego de dipolo como antena de referência é útil pois se trata de uma antena extremamente simples e fácil de implementar, principalmente quando se quer apresentar o ganho diretivo da antena em análise nas faixas de VHF e UHF, já a antena tipo isotrópico é um conceito puramente matemático e sem significado prático mas igualmente útil quando se quer apresentar o ganho diretivo da antena em análise com base numa antena ideal.

A antena isotrópica é um radiador hipotético (imaginário) que radia uniformemente em todas as direções do espaço (o diagrama 3D associado ao isotrópico é da forma de uma esfera) e não apresenta perdas, ou seja, é uma antena ideal e portanto não realizável na prática, mas que tem utilidade conceitual à medida que parâmetros de desempenho de antenas realizáveis (antenas implementadas na prática) podem ser apresentados tomando-se a antena isotrópica como referência de comparação.

Define-se Diretividade como sendo o máximo valor atingido pelo Ganho Diretivo de uma antena ou seja, se adotarmos por exemplo um radiador isotrópico como a antena de referência para definirmos o valor do Ganho Diretivo, veremos que qualquer outra antena, por menos direcional que possa ser, não irá conseguir radiar ou distribuir a energia aplicada aos seus terminais de forma tão uniforme ao seu redor como o isotrópico, de onde teremos sempre um Ganho Diretivo maior que 1, i.e. uma potência radiada por unidade de área tomada sobre a esfera de radiação maior do que aquela que seria provocada pelo isotrópico.

Recorrendo à Fig. 13, a esfera no canto inferior esquerdo representa a distribuição de potência uniforme por unidade de área característica de uma antena isotrópica, se tomarmos uma superfície quadrada de lado r e portanto $\text{área} = r^2$ (onde r é a distância do centro

• Diretividade

É o máximo valor atingido pelo Ganho Diretivo de uma antena

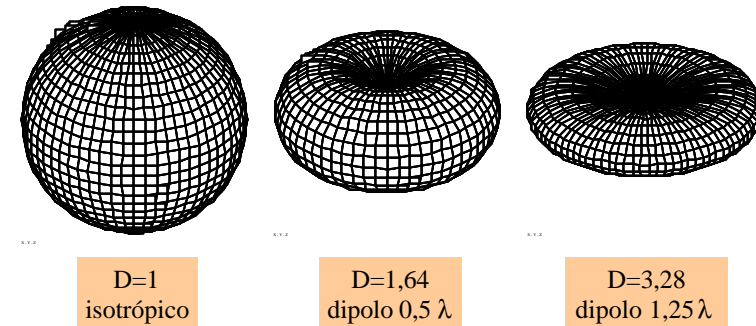


Figura 13 - Diretividade

até a superfície da esfera) sobre esta esfera e calcularmos a “intensidade de radiação” (que é a potência radiada por unidade de área) que atravessa esta superfície teremos determinado numericamente o valor da “intensidade de radiação” da antena isotrópica.

Se repetirmos este procedimento para uma antena tipo dipolo vertical de meia onda (como aquele da Fig. 7), que apresenta uma distribuição de potência mais concentrada ao redor da linha do equador conforme a figura central da Fig. 13, teremos em mãos o valor da “intensidade de radiação” do dipolo de meia onda.

Dividindo a “intensidade de radiação” do dipolo de meia onda assim obtido pela “intensidade de radiação” do isotrópico, vamos obter o valor $D=1,64$ que traduz o quanto o dipolo de meia onda foi capaz de concentrar energia por unidade de área a mais do que o isotrópico, vê-se ademais que esta concentração de energia ocorreu às custas de um estreitamento do diagrama de radiação de elevação do dipolo comparativamente ao isotrópico.

Avançando no exemplo, se tomarmos agora um dipolo de 1 onda e um quarto de comprimento, veremos que a Diretividade calculada será $D=3,28$ com relação ao isotrópico isto é, quanto maior o estreitamento do diagrama de radiação de elevação ao redor da linha do equador, maior a Diretividade resultante da antena em análise, verifique ainda que ao longo destes dois exemplos não houve alteração do diagrama de radiação de azimute, o que caso tivesse ocorrido também provocaria o aumento da Diretividade calculada.

Deste exemplo do dipolo vertical fica evidente portanto que o cálculo da Diretividade de uma antena deve levar em consideração o seu diagrama de radiação 3D.

Quando a Diretividade (D) de uma antena é definida com relação ao isotrópico e é calculado logaritmo base 10 deste valor, i.e. toma-se o valor de $10 \cdot \log(D)$ ao invés de D , a unidade passa a ser chamada de **dBi**; se por outro lado a Diretividade é definida com relação ao dipolo de meia onda e emprega-se logaritmo base 10 deste valor, a unidade passa a ser chamada de **dBd**.

Como a Diretividade de um dipolo de meia onda é igual a 1,64 vezes a Diretividade do isotrópico (que, por definição, é igual a 1) temos a seguinte igualdade: $0 \text{ dBd} \equiv 2,15 \text{ dBi}$. Esta igualdade permite de imediato converter valores de Ganho ou valores de Diretividade expressos em dBd para valores expressos em dBi e vice versa, por exemplo se a Diretividade de uma antena é igual a 10 dBd, a mesma antena pode ser apresentada como possuindo Diretividade igual a 12,15 dBi.

Para finalmente definir o que significa Ganho, é necessário introduzir o conceito de Eficiência de Radiação de uma antena. Mais uma vez o princípio da conservação de energia deve balizar o nosso raciocínio e permitir entender que, dado à natureza não ideal de

• Eficiência de Radiação e Ganho

A eficiência de radiação mede o quanto da potência aplicada nos terminais de entrada da antena está sendo radiado pela mesma: $\eta = P_r / P_o$ ($\eta < 1$)

O Ganho da antena leva em conta as propriedades direcionais bem como a eficiência: $G = \eta * D$

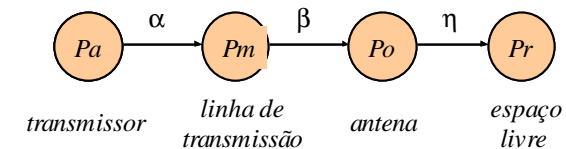


Figura 14 – Eficiência de Radiação e Ganho

qualquer antena que seja implementada na prática, parte da energia de radiofrequência aplicada em seus terminais irá ser transformado em calor, representando portanto uma perda, e parte irá ser transformada em ondas eletromagnéticas e será adaptada ao espaço livre por ação das propriedades físicas de radiação (ou transformação de energia) operadas pela antena.

Se P_o é a potência aplicada aos terminais da antena e P_r é a potência radiada (ou transferida para o espaço livre), defini-se numericamente Eficiência de Radiação como o parâmetro $\eta = P_r / P_o$ onde, pôr ação das perdas apresentadas pela antena, deduz-se que sempre η será menor do que 1.

A Fig. 14 apresenta este conceito de forma mais abrangente e aplicado na cadeia de transformação de energia desde a saída do transmissor até o espaço livre, onde os parâmetros α , β , η definem as eficiências nas várias etapas da cadeia. Verifique portanto que o parâmetro η (Eficiência de Radiação) diz respeito somente à antena,

existem outras eficiências que devem ser conhecidas para se conseguir determinar a potência ERP (ou potência efetivamente radiada).

Uma vez conceituado Diretividade e Eficiência de Radiação, concluímos que o Ganho de uma antena nada mais é do que a relação entre a potência radiada pela antena em análise e a potência radiada pela antena de referência, ambas as antenas com a mesma potência aplicada aos seus terminais de entrada.

Numericamente, basta multiplicar o valor da Diretividade (D) pelo valor da Eficiência de Radiação (η) e obter deste produto o valor do Ganho (G), ou seja: $G = \eta \cdot D$.

Na prática, não é comum e nem imediato medir-se a eficiência de uma antena isoladamente da sua Diretividade para só então determinar-se o ganho. O que habitualmente se mede é o parâmetro Ganho.

Entretanto quando o fabricante de antenas necessita especificar o Ganho de um arranjo complexo de antenas, onde na maioria das vezes não é econômico integrar todo o conjunto para se efetivar um ensaio, é lançado mão do conceito de Diretividade e do conceito de Eficiência de Radiação como apresentados anteriormente.

- *Impedância de entrada*

É a impedância presente nos terminais de entrada da antena quando a mesma é excitada. $\Rightarrow Z = R \pm jX$

Para uma dada frequência a impedância é determinada pela geometria, método de excitação, processo de fabricação e proximidade de objetos

Genéricamente $Z_d = Z_s + Z_m$

The diagram shows two antennas represented by orange starburst shapes. The left antenna is labeled with Z_s and the right one with Z_m . Below them, a double-headed arrow indicates a combined impedance Z_d . To the left of the diagram, the text 'Genéricamente $Z_d = Z_s + Z_m$ ' is written.

Figura 15 – Impedância de entrada

Quando excitada por uma fonte de sinal de radiofrequência, a corrente circulante nos terminais de entrada da antena irá apresentar amplitude e fase tal que dará origem ao parâmetro definido como Impedância de entrada da antena. Matematicamente define-se resistência de entrada como a relação entre as amplitudes da voltagem e da corrente nos terminais de entrada de um circuito, se esta relação matemática considerar adicionalmente as informações de fase entre a voltagem e a corrente tem origem o termo impedância de entrada, que caracteriza completamente o circuito quanto às suas propriedades resistivas e reativas (capacitiva ou indutiva).

Conhecer a impedância de entrada de uma antena é fundamental à medida que se pode determinar a eficiência da transferência de energia entre a linha e a antena e tomar-se providências para maximizar esta transferência de energia.

A máxima transferência de potência se dá somente quando a impedância de entrada da antena não apresenta componente reativa e sua componente resistiva é igual à componente resistiva da linha de transmissão que a alimenta, de onde surge portanto a especificação universal de impedância de entrada para antenas como sendo 50 ohms (se for operar no modo transmissão) ou 75 ohms (se for operar no modo recepção). Note que, na prática, não se faz menção à componente reativa, embora ela sempre exista e não permita se estar trabalhando na condição de máxima transferência de potência.

A impedância de entrada de uma antena é determinada pela frequência do sinal de excitação, pela geometria da antena, pelo método de alimentação empregado (balanceado ou não balanceado), pelos materiais utilizados no processo de fabricação e pela proximidade com o solo, outras antenas e/ou materiais condutores (torres, ferragens de sustentação, estais, etc.).

Para modelar estes efeitos de interação da antena com outros objetos em sua proximidade define-se mais genericamente a impedância de entrada de uma antena como a soma de duas componentes, isto é:

$$Z_d = Z_s + Z_m$$

onde

Z_d = impedância da antena na situação instalada

Z_s = impedância da antena no espaço livre ou impedância própria

Z_m = impedância mútua entre a antena e outros objetos

Na prática deve-se procurar minimizar Z_m ou η , se não for possível, adequar Z_s a fim de que a impedância que resulte na condição de operação Z_d seja a mais próxima possível da impedância da linha de transmissão que alimenta a antena.

• *Largura de Faixa*

Intervalo de frequência onde a antena atinge uma determinada especificação :

Largura de faixa de impedância \Rightarrow VSWR , η
 Largura de faixa de diagrama \Rightarrow Ganho , Lóbulos

FM	0.2 : [88-108] Mhz	0.23 - 0.18 %
TV #2-#6	6 : [54-88] Mhz	11.1 - 6.8 %
TV #7-#13	6 : [174-216] Mhz	3.45 - 2.78 %
TV UHF	6 : [470-746] Mhz	1.28 - 0.8 %

Figura 16 – Largura de Faixa

As propriedades de radiação de qualquer antena, quer seja a sua Impedância de entrada, Ganho, Diagrama de radiação ou Pureza da Elipse de polarização (mais sobre este assunto adiante) variam de forma distinta em função da frequência de operação, o que se busca no projeto de sistemas radiantes é gerar sistemas onde seja possível garantir especificações consistentes dentro de uma faixa de frequência de operação conhecida ou Largura de Faixa.

A determinação da largura de faixa de funcionamento de uma antena deve ser feito observando-se como varia o casamento de impedância da antena (VSWR) e a sua eficiência de radiação (η) em conjunto com a observação de como varia também o seu diagrama de radiação e ganho em função da frequência.

Uma determinada antena somente pode ser classificada como faixa larga ou faixa estreita se a largura de faixa de impedância e largura de faixa de diagrama forem compatíveis entre si e corresponderem à

mesma faixa de frequência.

Projetos que se adaptam bem à certas faixas de operação são impraticáveis em outras faixas, bem como as dificuldades impostas por cada serviço de radiodifusão em função da sua faixa de operação e canalização são bem distintos. A Fig. 16 apresenta um quadro com as larguras de faixa percentuais em função dos serviços FM e TV nas suas respectivas faixas de operação, enquanto aplicações FM requerem sistemas faixa estreita com largura de faixa percentual não superior à 0.23%, sistema de TV em banda baixa de VHF exigem sistemas com largura de faixa percentual até 11.1%.

• *Polarização*

Orientação do campo elétrico radiado pela antena, tomado na direção do lóbulo principal

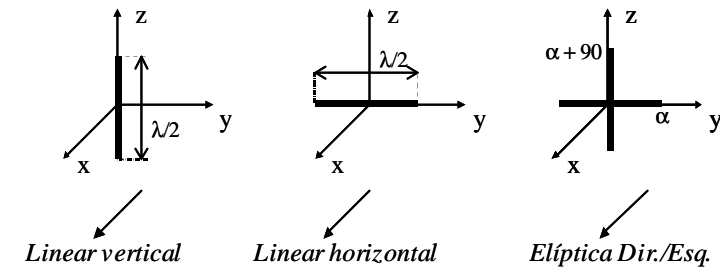


Figura 17 – Polarização

A orientação espacial em função do tempo do vetor campo elétrico da onda eletromagnética radiada por uma antena define a sua polarização. Como mostrado na Fig. 17, para uma antena dipolo a polarização linear da onda eletromagnética tem a mesma orientação mecânica da antena.

Quando se excitam dois dipolos espacialmente perpendiculares com sinais eletricamente defasados de 90 graus, dá-se origem à polarização elíptica, de onde a polarização circular é um caso especial que ocorre quando as potências são iguais nos elementos radiantes horizontal e vertical.

A importância de se conhecer a polarização da onda eletromagnética emitida por uma antena é crucial para se obter a máxima transferência de energia entre uma antena de transmissão e outra de recepção (alguém já tentou receber sinais de TV com uma antena Yagi orientada verticalmente com relação ao horizonte?).

Em transmissão de TV predomina a polarização horizontal, sendo a polarização elíptica mais rara e empregada somente em alguns casos e em centros urbanos para combater a despolarização da onda por efeitos de multipercurso numa tentativa de se melhorar a recepção local e indoor. Em transmissão de FM predomina polarização elíptica, sendo que mais recentemente vem se dando ênfase à transmissão em polarização vertical, visto aparentemente apresentar melhor resultado em situações de recepção móvel

• *Elipse de Polarização*

Representação gráfica da variação no tempo da magnitude do vetor campo elétrico tomado à uma distância fixa no espaço

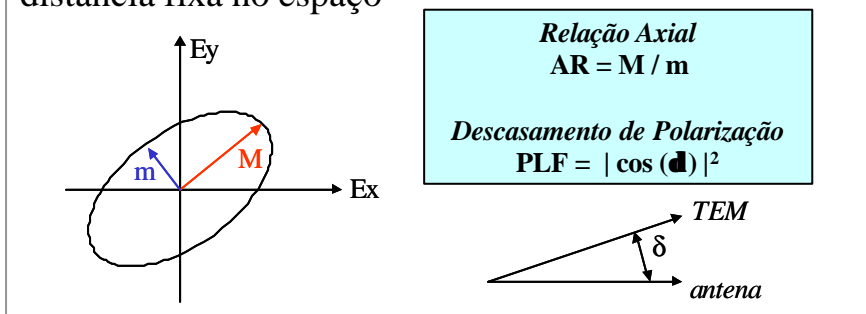


Figura 18 – Elipse de Polarização

Quando se emprega polarização elíptica, a visualização espaço-temporal do vetor campo elétrico é melhor representada graficamente pelo diagrama conhecido como “elipse de polarização”. Este diagrama representa o lugar geométrico do vetor campo elétrico e permite extrair parâmetros relevantes para a análise do enlace quando se opera em polarização elíptica.

Um parâmetro de interesse é definido como Relação Axial, ou “axial ratio - AR”, que representa o quociente entre o eixo maior e o eixo menor da elipse de polarização, o AR traduz a pureza da polarização circular, isto é se AR=1 significa que a onda eletromagnética gerada pela antena apresenta polarização circular, se AR se aproxima de 0 ou infinito trata-se de polarização linear. Em antenas de transmissão de polarização circular ou elíptica o que se procura é garantir AR o mais constante possível dentro da área de cobertura pretendida.

Na figura anterior mencionamos que a máxima transferência de energia entre uma antena de transmissão e outra de recepção somente se dá quando ambas possuem a mesma orientação de polarização, quando não é este o caso a medida deste descasamento de polarização pode ser calculada por intermédio da equação apresentada na Fig. 18 (válido para polarização linear).

A parte da orientação entre as antenas de TX e RX, o descasamento de polarização pode ser ainda provocado por fenômenos de propagação e por difração das ondas eletromagnéticas, além do mais a penalidade de se empregar polarização circular no TX e linear no RX será no máximo -3 dB, contra -∞ dB no caso do TX empregar polarização linear (imagine o TX transmitindo polarização horizontal e o vetor campo elétrico rodar 90 graus por efeitos de propagação). Por esta razão o emprego de polarização circular ou polarização elíptica na transmissão é preferido para a manutenção e robustez da comunicação em ambientes de elevada incidência de propagação multipercurso.

Analisando-se a conformação espacial das ondas eletromagnéticas ao redor de uma antena, conceitua-se o que se denomina de “regiões de campo” para fins de análise e caracterização das propriedades de radiação da mesma.

Como ilustrado na Fig. 19, a região externa imediatamente próxima da antena é chamada de região de campo próximo reativo e um pouco adiante de campo próximo de radiação, nestas regiões os campos elétrico e magnético da onda eletromagnética radiada pela antena não se encontram ortogonais (a 90 graus) e não se pode facilmente extrair as propriedades de radiação da antena, bem como deve-se evitar a proximidade de objetos e estruturas interferentes à operação da antena.

- *Regiões de Campo*

O espaço ao redor de uma antena pode ser subdividido em três regiões de campo distintas:

Campo próximo reativo R1
Campo próximo de radiação R2

Campo distante

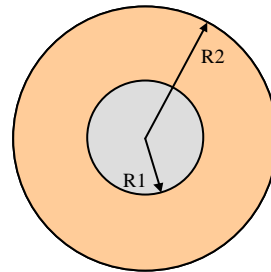
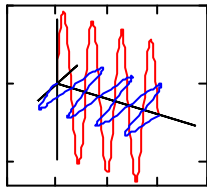


Figura 19 – Regiões de Campo

À partir de uma dada distância da antena conceituada como região de campo distante, a onda eletromagnética tem conformação TEM (transversal eletromagnética) e transporta a energia de RF espacial e temporalmente conformadas nos vetores de campo elétrico e de campo magnético, portanto compatíveis para se proceder à caracterização completa das propriedades de radiação da antena (empiricamente adota-se a distância de $(2 \cdot d^2) / \lambda$ onde d é a maior dimensão física da antena em comprimentos de onda e λ é o comprimento de onda).