
O "MISTÉRIO" DAS ANTENAS

PARTE I

"Trocando em miúdos", a teoria básica sobre antenas, imprescindível para o entendimento de como estas se comportam.

Luiz C. M. Amaral, PY1BTA

Muito se tem escrito sobre as mais variadas formas de antenas, seus desempenhos direcionais, seu desempenho em operação local e à distância, suas dimensões, etc... Mas muito, muito pouco mesmo se escreve na literatura do amador sobre os conceitos básicos envolvidos na teoria das antenas. Isto se explica pelo fato de que poucos dominam bem estes conceitos, dando origem a artigos que denotam insegurança, e até mesmo erros de concepção por parte dos próprios autores.

Este trabalho tem por finalidade tentar suprir os leitores de alguns elementos fundamentais, desmitificando outros que, na maior parte das vezes, são supervalorizados. Para isto é necessário que alguns conceitos básicos de teoria de circuitos estejam bem atualizados. Então, começamos com uma pequena revisão deles.

1) Elementos localizados e distribuídos

Circuitos cujas dimensões físicas são muito menores que o comprimento de onda dos sinais envolvidos, isto é, considera-se que a informação de um ponto a outro do circuito se propaga instantaneamente, são ditos de elementos localizados. É o caso dos circuitos eletrônicos normalmente conhecidos dos radioamadores. Neles, em cada ponto encontram-se os componentes resistores, indutores, capacitores,

resistores, transistores, válvulas, geradores, etc...

Nos circuitos de dimensões muito grandes, ou comparáveis com o comprimento de onda dos sinais, identifica-se um tempo de propagação das informações ao longo dos mesmos, isto é, esta informação viaja de um ponto a outro do circuito com velocidade finita. A velocidade de propagação é a velocidade da luz no meio onde a informação viaja. Nestes circuitos os componentes não se localizam nos diversos pontos dos mesmos, mas se distribuem ao longo deles. Assim, só definem-se resistências, indutância e capacitância por unidade de comprimento. É o caso das linhas de transmissão e das antenas.

Esta é a razão pela qual quando se quer dar um curto-circuito entre dois pontos em alta frequência não se pode utilizar um fio longo, mesmo de baixa resistência: quando a informação da tensão de um ponto chegar ao outro pelo fio, a tensão no primeiro já mudou de valor e assim nunca os dois pontos terão a mesma tensão. Já se baixarmos a frequência, a tensão no primeiro ponto muda de valor mais lentamente e, a partir de certo valor de frequência até zero (corrente contínua), o fenômeno não é mais notado, igualando-se a tensão nos dois pontos.

Na prática isto ocorre muito freqüentemente quando se quer ligar à terra o equipamento transmissor de rádio: se o fio

é longo demais é difícil se eliminar a R.F. do mesmo (frequência alta), porém os choques de 60 Hz (frequência baixa) desaparecem, significando que o equipamento fica no mesmo potencial da terra (0 volt) em 60 Hz, mas não em R.F.

2) Circuitos Lineares e Não Lineares

O circuito é linear se seus elementos não dependem das correntes ou tensões, isto é, quando os valores da resistência dos resistores, capacitância dos capacitores, indutância dos indutores, etc., são independentes das correntes ou tensões sobre eles.

Uma consequência imediata é que, quando se excita um ponto de um circuito linear com uma tensão (ou corrente) senoidal de frequência F , em todos os outros pontos a frequência das tensões e correntes será igual a F .

Num circuito não linear (elementos dependentes das correntes ou tensões) o mesmo pode não acontecer. Assim, para se obter harmônicos (duplicar, triplicar, etc.) de certa frequência, é necessário um circuito não linear (por exemplo, um transistor em classe B, C, etc.).

Além disto, num circuito linear a saída é proporcional à entrada. Por isto usa-se amplificadores lineares na saída dos transmissores com informação de amplitude (AM, SSB, DSB, etc.): a saída é a imagem da entrada (proporcional), e não há geração de harmônicos que diminuam a eficiência e perturbam outros serviços.

Os circuitos de antenas e linhas de transmissão são essencialmente lineares. Perdas dessa linearidade ocorrem quando a potência num cabo coaxial, por exemplo, é excessiva, aquecendo o mesmo e produzindo descargas através dos dielétricos; isoladores das antenas sujeitos a mal dimensionados permitindo descargas. O exemplo mais interessante ocorre quando contatos metálicos entre condutores nas antenas estão oxidados: o

óxido de cobre tem propriedades retificadoras, ou seja, de diodo, que é não-linear e gera harmônicos; assim, mesmo um transmissor livre de harmônicos pode irradiar (por geração na antena) harmônicos e TVI (atenção, pessoal!).

Doravante trataremos somente de elementos lineares, salvo indicação explícita em contrário.

3) Resistência e Reatância

Uma tensão contínua é aplicada a um elemento de circuito. A corrente resultante é proporcional à tensão aplicada, e a constante dessa proporcionalidade é, por definição, a resistência daquele elemento. Esta é a lei de Ohm, e que se expressa como: $I = \frac{V}{R}$, ou $V = RI$; com V

em volt, I em ampère e R em ohm.

A potência é passada do gerador ao elemento em questão, e

vale $P = VI$, ou $P = \frac{V^2}{R} = I^2 R$.

Assim, a energia entregue ao elemento se dissipa, não sendo mais recuperável pelo gerador. A resistência transforma a energia em calor através do chamado efeito joule.

Nos regimes alternados senoidais o processo é mais complicado, pela possibilidade de o elemento poder devolver parte ou toda a energia que lhe é entregue pelo gerador: a energia entregue num semiciclo é devolvida pelo elemento no semiciclo seguinte.

Esta propriedade de devolução de energia é a reatância do elemento.

O elemento puramente reativo não dissipa energia, pois tudo que recebe devolve. A consequência é que a tensão e a corrente nesses elementos de reatância pura estão defasados de 90° , isto é, quando a tensão é máxima (ou mínima), a corrente é zero, e vice-versa. A Lei de Ohm também vale para as reatâncias, mas, como os valores instantâneos da tensão e corrente não

são proporcionais devido à defasagem, a relação é uma proporcionalidade entre os valores de pico (ou RMS) V_0 da tensão e I_0 da corrente: $V_0 = |X| I_0$ ou $V_{RMS} = |X| I_{RMS}$, onde $|X|$ é o módulo da reatância (isto é, seu valor sem levar em conta sinal).

Os elementos mais simples que apresentam reatância são o capacitor e o indutor. O capacitor atrasa a tensão de 90° em relação à corrente, e o indutor atrasa a corrente de 90° em relação à tensão. As expressões das reatâncias são:

$$X_C = \frac{-1}{2\pi F C}, \text{ para o capacitor,}$$

onde F é a frequência, e C , a capacitância.

e

$$X_L = 2\pi F L, \text{ para o indutor.}$$

As reatâncias se associam como resistências (isto é, em série se somam, e em paralelo vale a lei dos inversos). Porém, tem-se que levar em conta os sinais, isto é, as reatâncias capacitivas são negativas.

Nos regimes alternados, nas resistências puras vale também a Lei de Ohm normal, pois não há defasagem alguma.

Concluindo, um elemento qualquer, quando excitado senoidalmente, dissipa energia na sua componente resistiva e devolve a energia armazenada na sua componente reativa. Lembre-se que só se define reatância para os regimes senoidais. Para outras formas de onda, não.

4) Impedância

Vimos a Lei de Ohm para os elementos resistivos puros ou reativos puros. Quando o elemento é misto, a Lei de Ohm se escreve: $V_0 = Z I_0$, ou $V_{RMS} = Z I_{RMS}$, onde Z é a impedância do elemento, e vale: $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$, onde X é a componente reativa, e R , a componente resistiva. O ângulo de fase, ϕ , é

$$\text{dado por } \text{Tg } \phi = \frac{X}{R};$$

Assim, a impedância é a relação entre os valores de pico (ou RMS) da tensão e corrente num elemento de circuito. Também, só é estritamente definida em termos senoidais.

Assim, generalizando, um elemento de circuito é linear quando sua impedância é independente da tensão (ou corrente) sobre o mesmo.

Como exemplo, seja um circuito RLC série como o da Fig. 1. Se aplicarmos uma tensão senoidal $V = V_0 \text{ sen } \omega t$, ($\omega = 2\pi F$) a corrente resultante será $I = I_0 \text{ sen } (\omega t + \phi)$, com

$$I_0 = \frac{V_0}{Z};$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}, \text{ ou}$$

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(2\pi F L - \frac{1}{2\pi F C}\right)^2}$$

$$\text{e } \text{Tg } \phi = \frac{2\pi F L - \frac{1}{2\pi F C}}{R}$$

Note-se que, se a frequência for tal que a reatância indutiva seja igual em valor à capacitiva (de sinais opostos), teremos:

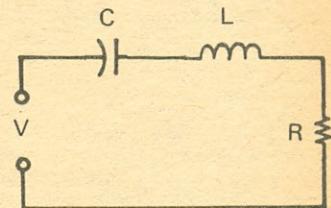


Fig. 1 - Circuito RLC série.

$$Z = \sqrt{R^2 + 0^2} = R, \text{ e } \text{Tg } \phi = 0, \text{ e } \phi = 0^\circ$$

Assim, Z terá seu menor valor possível ($= R$), e o ângulo de fase será 0° , isto é, a tensão e a corrente estarão em fase. Dessa forma obtém-se uma ressonância, isto é, a eliminação das reatâncias do circuito em questão.

Como Z é mínimo, a corrente é máxima e a potência é totalmente dissipada em R (pois

a reatância é zero, não havendo devolução de energia).

Conclui-se então que, no circuito RLC série, a ressonância corresponde à máxima transferência de energia para a resistência, com dissipação total, a impedância é mínima e igual a R, e a defasagem é nula. O circuito (nessa frequência de ressonância!) é equivalente somente a R.

Este circuito será muito utilizado nas nossas análises de antenas.

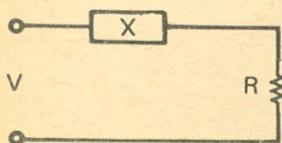


Fig. 2 - Neste circuito, X representa a reatância na frequência de trabalho.

Um resultado útil é que se dispõe de um circuito como na Fig. 2, onde X é a reatância na frequência de trabalho. O método mais eficaz de se transferir a potência máxima para R é colocar como na Fig. 3, uma reatância igual a X, mas de sinal oposto a fim de se obter uma reatância total nula. O cir-

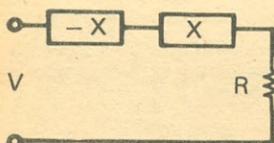


Fig. 3 - Para que a potência máxima seja transferida para R, é necessário colocar no circuito uma reatância de valor igual a X, mas de sinal contrário.

cuito, nessa frequência, é equivalente a R.

Este, como veremos mais tarde, é um dos papéis dos acopladores de antena.

Como X depende da frequência, em cada uma teremos valores diferentes dos elementos que compõem a reatância - X para obtermos a máxima transferência de potência. Por isso os acopladores de antena têm de ser ajustados em cada frequência de operação.

5) Fator de Mérito, ou Q:

No circuito RLC, série estudado define-se Q como sendo:

$$Q = \frac{2\pi FL}{R} = \frac{X_L}{R}; \text{ na ressonância, } 2\pi FL = \frac{1}{2\pi FC}$$

$$Q = \frac{1}{2\pi FCR} = \frac{-X_C}{R}$$

Na ressonância, como vimos, a transferência de potência é máxima. Então existem duas frequências em que a transferência é apenas de metade dessa potência máxima, como na Fig. 4. A frequência de ressonância dividida pela diferença dessas duas

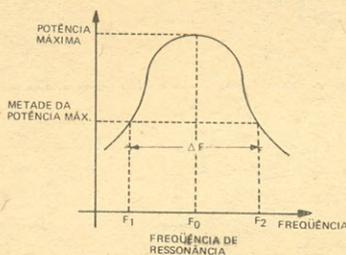


Fig. 4 - Gráfico que mostra a faixa de passagem de um circuito. F₁ e F₂ são as frequências nas quais a potência cai à metade.

freqüências é também o Q na ressonância: $Q = \frac{F_0}{F_2 - F_1} = \frac{F_0}{\Delta F}$

Assim, a largura de faixa de um circuito está ligada ao fator Q do mesmo. Maior o Q, menor a largura de faixa e vice-versa.

6) Transferência máxima de potência de um gerador para uma carga

Seja o circuito (linear) da Fig. 5, onde r é a resistência do

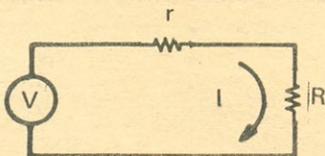


Fig. 5 - Neste circuito r representa a resistência interna do gerador V, e R, a resistência da carga.

gerador de tensão V, e R, a resistência de carga à qual se quer transferir a potência. Procura-se o valor de R que conduz ao máximo de transferência de potência.

A corrente I, pela Lei de Ohm, é: $I = \frac{V}{r + R}$, e é a mesma em r e R.

A potência dissipada em R é:

$$P = RI^2 = R \left(\frac{V}{r + R} \right)^2 =$$

$$= V^2 \frac{R}{(r + R)^2}$$

Mostra-se, matematicamente, que essa potência em R é máxima se r = R.

Nessas condições, a potência gerada pelo gerador V é dissipada metade na sua resistência interna r, e metade na carga R (que é igual a r). O sistema, então, rende 50%, isto é, somente metade vai para a carga.

Se estivermos no caso da Fig. 6, onde as reatâncias se acham presentes tanto na carga quanto no gerador, o caminho para se maximizar a transferência de potência à carga é aumentar a corrente sobre ela, anulando-se as reatâncias (pela introdução de reatâncias de sinal oposto) e igualando-se as resistências, como na Fig. 7.

Introduz-se uma reatância Xi, tal que Xi + Xg + X = 0 (reatância total nula) e ajusta-se a carga para que seja igual a r.

7) Transformador Ideal (Primário e 1 - um - Secundário).

Um transformador ideal é um conjunto de duas bobinas sem perdas, magneticamente bem acopladas, e de circuitos eletricamente isolados. A relação de espiras é N, isto é, se tem no primário N_p espiras e no secundário N_s espiras, $N = \frac{N_s}{N_p}$.

Se se aplica no primário uma tensão alternada V, no secundário se tem uma tensão $V_s = N \frac{V_p}{N_p}$, ou $V_s = \frac{N_s}{N_p} V_p$.

Se colocamos no secundário (Fig. 8) uma resistência R , a corrente no secundário é $I_s = \frac{V_s}{R}$, pela Lei de Ohm.

Como não há perdas, a potência no primário $P_p (= V_p \cdot I_p)$ é igual à potência no secundário, $P_s (= I_s \cdot V_s)$, isto é, toda a potência no primário vai para a resistência R , temos: $P_p = P_s$ ou $V_p I_p = V_s I_s$, mas $V_p = \frac{V_s}{N}$

, portanto: $\frac{V_s}{N} I_p = V_s I_s$, ou

$I_p = N I_s$, isto é, a corrente no primário, I_p , é proporcional à corrente do secundário.

Assim, o gerador V_p aplicado ao transformador com carga R , produz no primário uma corrente I_p .

Se substituirmos o conjunto por uma resistência $r = \frac{R}{N^2}$,

na Fig. 9, o gerador não "percebe", pois a corrente seria

$$i = \frac{V_p}{\frac{R}{N^2}}$$

ou $i = \frac{V_p}{R} N^2 = \frac{V_s N}{R} = I_s N = I_p$,

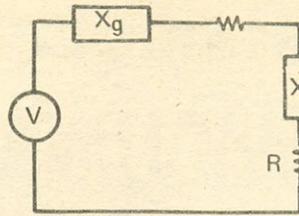
ou seja, $i = I_p$.

Assim, se dispõe de uma carga R , e se queremos acoplá-la a um gerador de modo que este "veja" uma carga r , basta utilizar um transformador, de modo que a relação de espiras seja $N = \sqrt{\frac{R}{r}}$

Esta transformação (chamada de modo genérico de transformação de impedâncias) pode ser obtida através de vários circuitos L C, não sendo necessário o emprego de transformador com primário e secundário convencional. Nos "Handbook's" são mostradas várias formas de transformadores de impedância.

Agora já temos meios para entender o que é um acoplador de antenas.

Um gerador (transmissor) de resistência interna r (50Ω , 75Ω ,



$X_g = \text{REAT\ANCIA DO GERADOR}$

$X = \text{REAT\ANCIA DA CARGA}$

Fig. 6 – Neste circuito, tanto o gerador como a carga apresentam reatâncias.

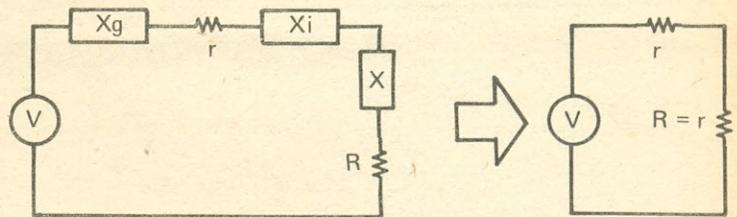


Fig. 7 – Para se obter o máximo de potência na carga é colocada no circuito a reatância X_i , que, em conjunto com X_g e X , proporciona uma reatância total nula.

300Ω , etc.) deve ser acoplado a uma carga de resistência R e reatância X (uma antena qualquer).

Se se quer máxima transferência de potência, o transmissor tem que "ver" uma resistência pura (sem reatâncias) igual à sua resistência interna r .

Assim, o papel geral do acoplador é anular as reatâncias vistas pelo transmissor, e transformar a resistência equivalente "vista", R , para o valor r , através de uma transformação de impedâncias.

Estes são os 7 (sete) pontos de revisão de conceitos do nosso

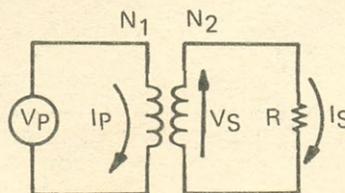


Fig. 8 – Transformador ideal, que alimenta uma carga R colocada em seu secundário, a partir de um gerador V_p aplicado ao primário.

trabalho, que, note-se, são fundamentais, pois fica impossível discutir qualquer coisa além, sem o seu perfeito entendimento.

Talvez maçante para alguns e (espero!) interessante para outros, esta parte termina aqui. Na seguinte, veremos os conceitos fundamentais das linhas de transmissão e antenas, quais sejam, impedâncias características, resistência de radiação e de perda, relação de ondas estacionárias (a quase mística r.o.e.), e outros.

□ OR 2243 – Conclui no próximo número

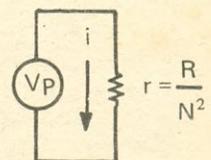


Fig. 9 – Se o conjunto ligado ao gerador V_p da Fig. 8 for substituído por uma resistência r , de valor $\frac{R}{N^2}$, para o gerador será como se nada tivesse sido modificado.