

As Linhas de Transmissão*



DAVID P. COSTA

Princípios básicos e características das linhas de transmissão e as vantagens e desvantagens dos diversos tipos.

A linha de transmissão é um dispositivo para conduzir energia elétrica de um ponto a outro. O bom êxito nesta tarefa depende das características da linha de transmissão usada. A saída de um circuito elétrico é acoplada à entrada da linha de transmissão, que é o lado do gerador ou da fonte. A carga é acoplada à saída da linha, isto é, o lado da carga. A relação entre tensão e corrente na entrada é a impedância de entrada. A relação entre tensão e corrente na saída é a impedância de saída. Se a linha tivesse comprimento infinito, a impedância característica seria a relação entre tensão e corrente da linha infinita. Esse valor é constante para uma determinada linha de transmissão.

CONSTANTES DISTRIBUÍDAS

A linha de transmissão é essencialmente um dispositivo de quatro terminais — Dois terminais são ligados à fonte, e os dois outros à carga. Entre esses terminais ficam as constantes distribuídas de indutância, capacitância e resistência. Seus valores dependem das características físicas da linha, tais como comprimento, tamanho dos condutores, espaçamento entre os condutores, e do dielétrico (ar ou isolamento) entre os condutores.

Supondo uma linha de transmissão de comprimento infinito, a impedância característica, Z_0 , determina a corrente que passa quando se aplica determinada tensão. A im-

pedância característica é importante na determinação do grau de eficiência com que a energia se transfere da fonte para a carga. Na linha infinitamente longa, toda a energia é lançada na linha, nada retornando à fonte. Quando a linha finita é ligada a uma carga resistiva igual a Z_0 , a fonte "vê" o que lhe parece uma linha infinitamente longa, e toda a energia passa para a linha. Se a linha for aplicada a qualquer outra carga, a energia se refletirá, retornando à fonte.

ATENUAÇÃO E PERDAS

A linha de transmissão ideal não tem perdas. Ela transfere toda a energia disponível na fonte para a carga. As linhas de transmissão reais, contudo, dissipam energia sob três formas diferentes: radiação, aquecimento e reflexão.

As linhas de transmissão de determinados tipos tendem a funcionar como antenas. As perdas de radiação de algumas podem ser bastante elevadas.

A resistência dos condutores dissipa determinada quantidade de energia sob a forma de calor (I²R). Uma tuga entre os condutores também da origem a perdas desse tipo. As perdas por aquecimento são maiores nas linhas de menor impedância característica, dadas as correntes mais elevadas que podem então circular.

Uma carga de valor diferente de Z_0 reflete energia de volta ao longo da linha, isso resulta em perdas por reflexão. Quando a energia é refletida, formam-se ondas estacionárias, o que implica uma relação variável entre tensão e corrente ao longo da linha e, conseqüentemente, uma impedância variável através desta.

Se toda energia é refletida do extremo de saída e nenhuma é absorvida pela carga,

(*) CQ, vol. 25, nº 7.

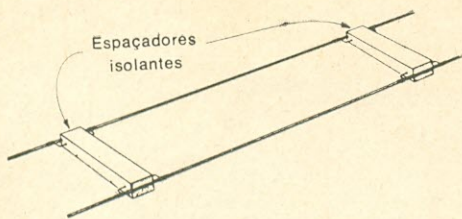


FIG. 1 — A linha bifilar aberta, por vezes chamada de linha paralela, usa o ar como dielétrico. A impedância característica depende do diâmetro e do espaçamento dos fios.

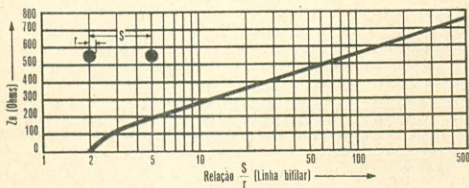
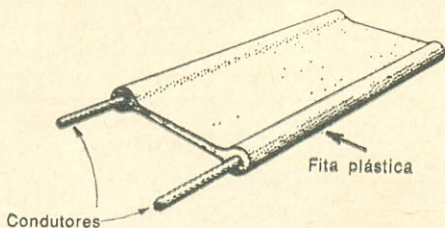


FIG. 2 — Variação da impedância característica Z_0 em função da relação S/R para uma linha bifilar aberta.

a impedância mantém-se puramente reativa em toda a extensão da linha. Quando parte da energia é absorvida e parte refletida, a impedância pode ser resistiva ou pode apresentar componentes resistivos e reativos.

Quando a fonte injeta energia numa impedância de linha igual à impedância característica, não há ondas estacionárias nem reflexões. A indutância, capacitância e resistência das linhas de transmissão são distribuídas uniformemente pelo seu comprimento. Conseqüentemente, não ocorre reflexão de energia, a menos que a impedância em determinado ponto da linha seja diferente da provocada pelas constantes distribuídas. A impedância "vista" pela fonte pode ser alterada mudando-se a carga. As ondas progressivas que alcançam a carga subitamente encontram uma impedância diferente da existente ao longo da linha, o que resulta na formação de ondas estacionárias e na reflexão

FIG. 3 — Seção transversal de uma linha bifilar isolada. Embora seja mais flexível e mais fácil de instalar que a do tipo de dielétrico de ar da Fig. 1, o tipo de fita isolada ilustrado abaixo apresenta maiores perdas no dielétrico.



de energia. Sempre há reflexões quando a carga é diferente de Z_0 .

RELAÇÃO DE ONDAS ESTACIONÁRIAS

As cargas ligadas na prática à linha de transmissão geralmente possuem componentes reativo e resistivo. Considerando a onda estacionária de tensão, a relação entre as tensões máxima e mínima ao longo da linha é a relação de ondas estacionárias. A R.O.E. pode ser determinada medindo-se as correntes máxima e mínima através da linha. A R.O.E. fornece uma medida da energia refletida. Quando a linha termina em uma resistência igual a Z_0 , os valores máximo e mínimo de corrente são os mesmos e a R.O.E. é de 1:1. Quando isso acontece, diz-se que a carga está equilibrada com a linha. Toda a energia é absorvida pela carga (desprezando-se as perdas na linha) e não há ondas estacionárias. Uma linha nestas condições é chamada plana, uma vez que a impedância, Z_0 , tem o mesmo valor em todos os pontos da linha.

Ocorrendo ondas estacionárias na linha com determinada carga, a R.O.E. constitui uma medida do grau de desequilíbrio entre carga e linha. Por exemplo, admitindo-se que se use uma carga resistiva de 500 Ω como terminação de uma linha de impedância característica, Z_0 , de 50 Ω , a R.O.E. medida será de 10:1. Isto equivale a dividir 500 por 50.

EQUILIBRIO DE IMPEDÂNCIAS

Admitamos que uma linha de transmissão tenha impedância característica diferente da impedância da carga. Como haverá desequilíbrio se a linha for ligada diretamente à carga, será preciso utilizar um elemento intermediário de equilíbrio de impedâncias entre a linha e a carga.

TIPOS DE LINHA DE TRANSMISSÃO

As linhas de transmissão divergem consideravelmente em sua construção e características específicas. Dentre os vários tipos, contam-se a linha unifilar, a linha bifilar aberta a linha bifilar isolada, o par blindado, o par torcido e as linhas coaxiais.

Linha unifilar — É o tipo mais simples de linha de transmissão, no qual um fio condutor único liga a fonte à carga. O retorno, que completa o circuito, é feito pela terra. A linha é desequilibrada; isso ocasiona grandes perdas de radiação, o que constitui uma desvantagem sensível. Outra desvantagem é a falta de uma relação física constante entre a linha e a terra, o que provoca variações na impedância característica, dificultando o equilíbrio da linha com a carga. Em virtude des-

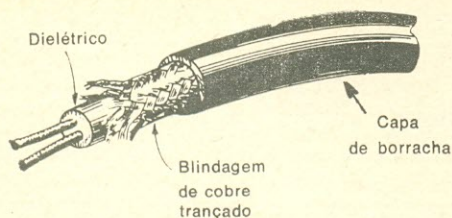


FIG. 4 — O cabo blindado, ilustrado acima, tem a vantagem de apresentar baixas perdas de radiação, porque a blindagem fornece uma terra uniforme para ambos os condutores.

tes dois inconvenientes, a linha unifilar é raramente usada, ressaltando-se os casos em que sua vantagem da facilidade de instalação compensa as desvantagens.

Linha bifilar aberta — Em virtude de usar dois condutores paralelos também se denomina linha paralela ou linha aberta de dois fios, porque o meio dielétrico é o ar. A construção e instalação da linha bifilar aberta é quase tão simples quanto a da unifilar. Embora os condutores equilibrados reduzam a perda de radiação, o equilíbrio é crítico, e os objetos metálicos próximos tendem a desequilibrar a linha, provocando grandes perdas de radiação.

Os dois fios usados nessa linha são mantidos a uma distância constante um do outro, por intermédio de espaçadores isolantes, representados na Fig. 1. A distância real entre os condutores depende da impedância exigida, do diâmetro dos condutores e da frequência de operação. A impedância característica de uma linha bifilar é relativamente constante. Para a linha bifilar, que tem o ar como dielétrico, Z_0 é dada pela fórmula:

$$Z_0 = 276 \log_{10} S/R,$$

onde S = espaçamento entre os centros dos condutores e R = raio dos condutores.

FIG. 5 — Vista expositiva de uma linha coaxial de dielétrico de ar, usando tubo metálico flexível como condutor externo. Os cabos coaxiais mais comuns são do tipo ilustrado na Fig. 4, porém com um único condutor interno, dielétrico sólido, e condutor externo de cobre trançado.

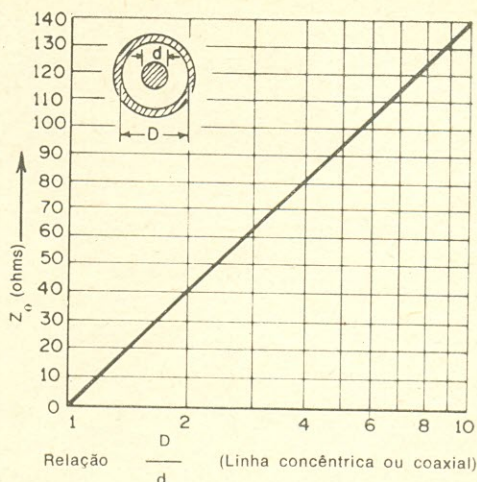
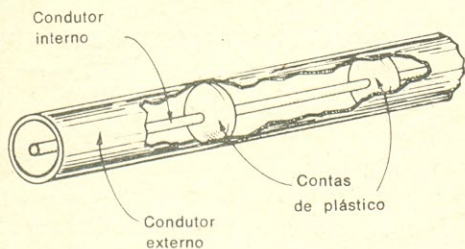


FIG. 6 — Variação de Z_0 em função da relação D/d para cabo coaxial de dielétrico de ar.

Essa fórmula é suficientemente precisa, desde que a relação S/R seja igual a 4 ou mais. O gráfico da Fig. 2 mostra a variação de Z_0 produzida por uma variação da relação S/R . As correntes percorrem dois condutores paralelos em sentidos opostos. Se as duas correntes estão defasadas de 180° , os campos praticamente se cancelam, e a perda de radiação se avizinha de zero. Em frequências relativamente baixas, isso pode acontecer. À medida que aumenta a frequência de operação, contudo, as duas correntes tendem a ficar cada vez mais fora de fase, provocando consideráveis perdas de radiação. A perda pode ser reduzida aproximando-se os condutores um do outro. A aproximação dos condutores faz diminuir a impedância característica da linha. Isso pode ser deduzido da equação acima. Para se ter uma impedância relativamente elevada e espaçamento pequeno, é necessário reduzir o diâmetro do condutor. A redução do calibre, contudo, diminui a capacidade de condução de corrente do condutor. Quanto maior a frequência de operação, mais difíceis se tornam esses problemas.

Linha bifilar isolada — Em vez de utilizar o ar como dielétrico, a linha bifilar pode ser embutida num dielétrico sólido. Este tipo de linha tem várias vantagens sobre a linha aberta. A instalação fica consideravelmente simplificada, dada a sua flexibilidade. Por exemplo, é difícil passar a linha bifilar aberta em torno de um ângulo, sem alterar o espaçamento entre os condutores. No tipo isolado, o dielétrico é suficientemente sólido, mantendo os condutores espaçados uniformemente, ao mesmo tempo em que apresenta uma flexibilidade que permite dobrá-lo facilmente em torno de ângulos. Em certo tipo

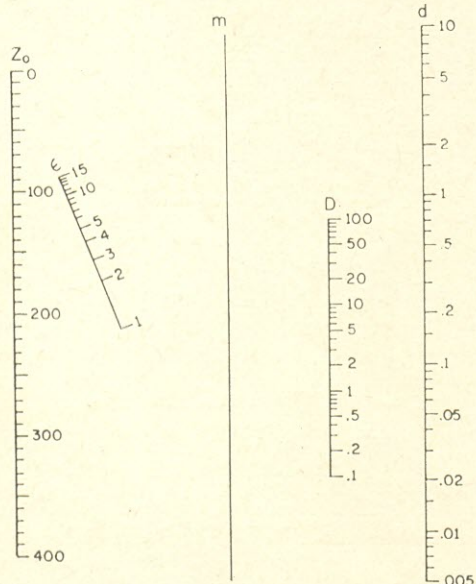


FIG. 7 — Nomograma para determinação de Z_0 de uma linha coaxial de dielétrico sólido. Seu emprego, em duas etapas, é explicado no texto.

de linha isolada, os dois condutores são moldados nas bordas de uma fita plástica (ver Fig. 3). As perdas dielétricas são maiores do que numa linha aberta equivalente, e a constante dielétrica mais elevada diminui a impedância característica.

Par blindado — Um outro aperfeiçoamento da linha biniar isolada é o par blindado (Fig. 4). Os dois condutores paralelos são embutidos num dielétrico sólido. O par isolado e, então, encerrado em um tubo constituído de fios de cobre trançados. A vantagem principal do par blindado sobre as outras linhas biniaras e sua baixa perda de radiação. Isso porque a blindagem provê um aterramento uniforme para ambos os condutores, tornando a linha bem equilibrada. Além do mais, a blindagem oferece proteção contra captações espúrias em presença de campos externos.

Par torcido — Se dois fios isolados forem torcidos, teremos uma linha de transmissão flexível, sem espaçadores. Este tipo é aplicável apenas como linha curta, não sintonizada, por causa de suas perdas elevadas.

Linhas coaxiais — É possível colocar um condutor por dentro do outro, para formar uma linha de transmissão. Este tipo de linha é denominado coaxial ou concêntrico. A Fig. 5 mostra a linha aberta (dielétrico de ar). Geralmente consiste em um fio condutor disposto no interior de um tubo de metal flexível,

ou blindagem, que serve como segundo condutor. O fio interno é fixado ao longo do eixo central do tubo externo, por intermédio de espaçadores. A linha coaxial aberta trabalha eficientemente em frequências relativamente altas. A perda de radiação desse tipo é bastante baixa, porque o condutor externo confina a radiação ao espaço no interior da linha. Os objetos externos, conseqüentemente, não exercem efeitos sobre a transmissão, tornando esta linha indubitavelmente superior ao tipo de dois fios. Em vez de ar, a linha pode ser preenchida com um dielétrico flexível, tornando uma linha coaxial de dielétrico sólido, que proporciona maior flexibilidade do que a linha coaxial aberta. O uso de dielétrico sólido, contudo, aumenta as perdas no dielétrico. A impedância característica da linha coaxial aberta pode ser calculada pela fórmula:

$$Z_0 = 138 \log_{10} D/d,$$

onde D = diâmetro interno da blindagem e d = diâmetro do fio.

As variações de Z_0 , em função da relação D/d , são representadas na Fig. 6. A fórmula para Z_0 , numa linha coaxial sólida, é dada pela fórmula:

$$Z_0 = \frac{138}{\sqrt{\epsilon}} \log_{10} D/d,$$

onde ϵ = constante dielétrica do material entre os condutores.

As outras variáveis são as mesmas do caso da linha coaxial aberta. Para ϵ igual a 1 (constante dielétrica do ar), as duas fórmulas tornam-se idênticas. As duas fórmulas indicam que uma elevada relação D/d significa um alto valor de Z_0 e, inversamente, uma relação baixa significa um baixo valor de Z_0 .

O projetista de sistemas de comunicações e eletrônicos freqüentemente se vê confrontado com o problema da determinação da impedância característica de linhas concêntricas, a fim de equilibrá-las adequadamente com as impedâncias de instrumentos eletrônicos, medidores, etc. O nomograma da Fig. 7 resolve a equação acima para qualquer escala de dimensões.

Exemplo: Qual a impedância característica de uma linha coaxial, se o diâmetro do fio (d) é de 0,06 cm, o diâmetro interno da blindagem (D) é de 0,85 cm, e a constante dielétrica do material (ϵ) entre os condutores é de 4,0?

Solução: 1) Unir (d) com (D), obtendo a interseção (m). 2) Unir (m) com (ϵ), e determinar Z_0 igual a 80 Ω . ©