

Entendendo a diafonia (*crosstalk*)

Paulo S. Marin

Doutor em EMI/EMC aplicada a infraestrutura de TI

(Artigo publicado na Revista RTI, Ano XXIII, Nº 263, abril/2022.)

Embora muitas vezes apresentada como algo novo, cuja importância parece estar diretamente relacionada a transmissão de dados em cabos de cobre em sistemas de cabeamento estruturado, a diafonia (*crosstalk*, em inglês) é um efeito que remonta aos anos de 1920, início das comunicações telefônicas de longa distância.

O termo diafonia é a junção do prefixo grego ‘dia’, que significa através, e o termo ‘fonia’ (também de origem grega), que expressa a noção de som, voz. Portanto, diafonia significa, essencialmente, a passagem de um sinal audível de um meio a outro. De forma mais objetiva, considerando que o termo vem de comunicações de voz por meio de cabos de pares trançados (balanceados), diafonia expressa a transferência (ou vazamento) de sinal de voz de um par a outro do cabo, que é o efeito conhecido como “linha cruzada”, expresso de forma mais direta no termo equivalente em inglês (*crosstalk* = fala cruzada). Embora oriunda das primeiras comunicações analógicas de voz, a diafonia ocorre da mesma forma em transmissão de sinais digitais, não necessariamente audíveis pelo ouvido humano. É importante explicar, entretanto, que o efeito de linha cruzada em comunicações telefônicas de voz é coisa do passado.

Embora tratada como um parâmetro de transmissão, a diafonia é, de fato, um efeito de interferência eletromagnética entre sinais que se propagam em canais próximos. A quantidade do sinal acoplado em um determinado canal como consequência da diafonia é ruído. Por esse motivo, a diafonia precisa ser controlada.

Antes de entrarmos em mais detalhes, é importante entender que diafonia é diafonia, ou seja, não há variações ou tipos diferentes de diafonia. Além disso, ela ocorre sempre, e somente, devido a interferência eletromagnética, quando relacionada a sistemas de transmissão que utilizam cabos metálicos como meio de transmissão¹.

Como a diafonia acontece devido a acoplamentos entre canais (ou circuitos), vou iniciar a discussão com uma breve revisão sobre canais de transmissão constituídos por cabos metálicos.

Canais constituídos por cabos metálicos

Há uma variedade de cabos metálicos utilizados para a transmissão de sinais, cada um com uma constituição diferente e mais ou menos adequado a determinado sistema e/ou aplicação. O interesse em cabos metálicos e seus efeitos em transmissão de sinais data do

¹ Isso é importante porque o termo diafonia também é utilizado em outros sistemas de comunicação.

início das comunicações telefônicas, de modo que trabalhos publicados naquela época, como os de Nyquist, para citar um exemplo, ainda são de interesse nos dias de hoje.

Neste artigo, vou colocar o foco nos cabos balanceados de cobre. É importante mencionar, entretanto, que há cabos fabricados com condutores que empregam outros materiais. No entanto, em sistemas de cabeamento estruturado, os cabos balanceados devem ser de cobre, por força da normalização vigente.

Os canais de transmissão são descritos por parâmetros de linha distribuídos tais como resistência, indutância, capacitância e condutância por unidade de comprimento. Em geral, um canal pode ser descrito por um arranjo de resistência e indutância em série, juntamente com capacitância e condutância em paralelo. Embora esses quatro parâmetros tenham sido desenvolvidos inicialmente para linhas de transmissão paralelas abertas, todos os canais de transmissão podem ser caracterizados por meio desses parâmetros, com alguma variação dependendo do tipo de cabo. Um dos modelos que melhor representa o cabo balanceado é o modelo "T" simétrico, conforme mostrado na Figura 1.

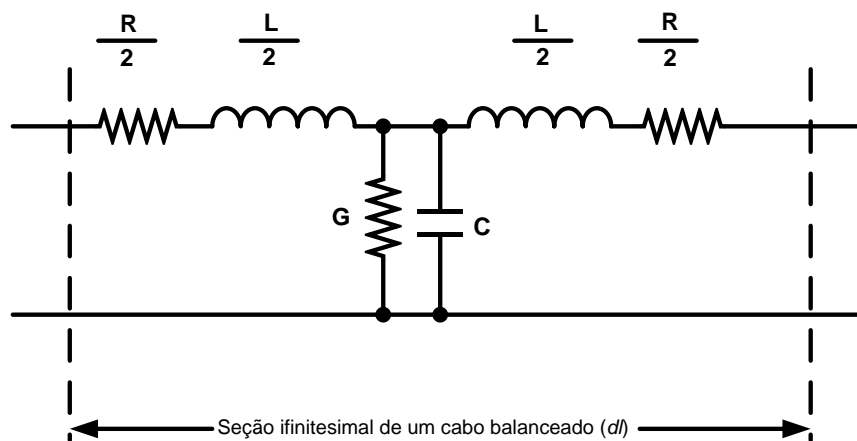


Figura 1 – Modelo "T" simétrico representativo de um cabo balanceado

Os parâmetros de linha podem ser considerados uniformemente distribuídos ao longo do canal e variam com a frequência. Para cabos com capas de PVC (e compostos plásticos em geral), a condutância (G) pode ser considerada nula e, para cabos balanceados, a indutância mútua (L) é reduzida, porém participa do mecanismo de diafonia, assim como a capacitância mútua (C), por meio do desequilíbrio capacitivo entre os pares. A resistência (R) também é um parâmetro crítico, pois afeta a resposta de atenuação do canal, que é um parâmetro importante para a determinação de seu desempenho juntamente com sua resposta de diafonia. Veremos mais adiante relações importantes entre a diafonia e a atenuação.

O modelo da Figura 1 pode ser compreendido como uma parte muito pequena (infinitesimal) representativo de um cabo balanceado, da ordem de poucos milímetros. Para modelar um cabo de um determinado comprimento, da ordem de dezenas de metros, milhares de seções devem ser cascateadas em série, conforme mostrado na Figura 2.

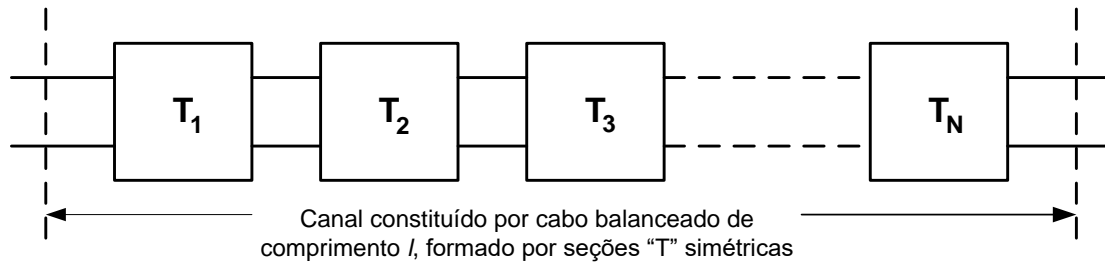


Figura 2 – Seções “T” em cascata para modelar um segmento de cabo balanceado

O modelo em cascata da Figura 2 nos leva a concluir que, quando as seções “T” são conectadas em série para formar um canal de comprimento longo, os valores dos parâmetros de linha (de cada seção “T”) são somados contribuindo, portanto, para os valores dos parâmetros primários desse canal.

Parâmetros primários e secundários do canal

Um canal é caracterizado por seus parâmetros primários (R, L, G e C) que, como o próprio termo sugere, são característicos do canal, ou seja, são determinados pelos materiais utilizados nos condutores, nos dielétricos, pela geometria do cabo e outros aspectos construtivos. Esses parâmetros são independentes dos métodos de instalação, utilização, aplicações etc.

Os parâmetros secundários são derivados dos primários e são:

- **Impedância característica (Z_0):** de forma bastante simplificada e prática, pode ser entendida como a resistência elétrica equivalente do canal de transmissão em função dos parâmetros R, L, G e C. Para cabos balanceados utilizados em cabeamento estruturado, a impedância característica é de 100 Ω .

Uma implicação importante a partir da impedância característica do cabo é que as cargas conectadas a ele devem apresentar o mesmo valor de Z_0 , para garantir o casamento ótimo de impedâncias entre os equipamentos ativos de TI conectados por garantir, basicamente, reflexão mínima de sinal entre transmissor e receptor e, portanto, melhor desempenho do sistema de comunicação.

- **Atenuação:** é a resposta do canal de transmissão que causa a redução da potência de um sinal que se propaga por ele e está diretamente relacionado com a resistência elétrica do condutor, tanto em corrente contínua quanto em corrente alternada, que varia em função da frequência.

A atenuação, embora diretamente associada aos aspectos construtivos dos cabos, especialmente no que diz respeito ao material do condutor e sua bitola, está sujeita a variações importantes em função da frequência e temperatura do ambiente de operação. O valor da atenuação aumenta com o aumento da frequência e da temperatura.

- **Deslocamento de fase e velocidade de propagação:** diretamente relacionados, ambos os efeitos afetam a posição do sinal na saída do canal em relação à sua entrada.

A velocidade nominal de propagação, referida como uma porcentagem da velocidade da luz no vácuo, depende do material do meio de transmissão e do comprimento do canal. Como os pares de um cabo balanceado não têm exatamente os mesmos comprimentos (os passos de torção não são uniformes), os sinais se propagam por eles em tempos diferentes. Essa diferença é denominada desvio de atraso de propagação, ou *delay skew* e é medida como a diferença entre os pares “mais rápido” e “mais lento” do cabo. Essa diferença é importante especialmente em sistemas de comunicação *full-duplex* nos quais a informação é particionada e transmitida simultaneamente por meio dos quatro pares e deve ser entregue ao receptor dentro de um intervalo de tempo predeterminado pela aplicação.

Portanto, um sinal aplicado a entrada de um canal de transmissão estará sujeito às suas características de resposta, que são diretamente relacionadas aos parâmetros primários e secundários do canal, assim como a outros fatores externos, conforme mostrado na Figura 3.

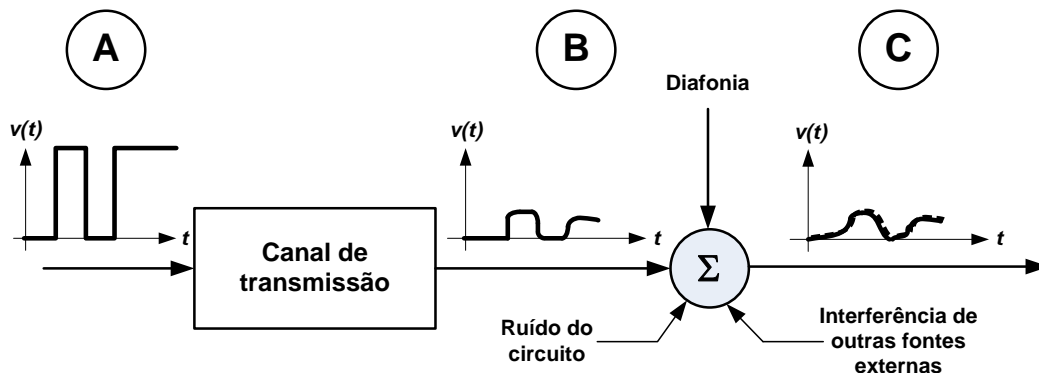


Figura 3 – Efeitos do canal sobre um sinal que se propaga por ele

Conforme mostrado na Figura 3, um sinal gerado pela eletrônica de um equipamento ativo de TI (placa de rede, porta de switch etc.) aplicado a entrada do canal (A) sofre seus efeitos por causa dos parâmetros primários e secundários e chega à saída (B) atenuado e defasado. Outros efeitos que afetam a integridade do sinal (C), que são externos ao canal, porém incorporados a ele devem ser levados em consideração, como o ruído do circuito, a diafonia, interferências de outras fontes externas, entre outros.

Portanto, notamos que o sinal é aplicado ao canal com uma forma de onda bem definida (A) e chega à entrada do receptor bastante distorcido (C). Como não é possível controlar as características de resposta do canal por práticas de instalação, precisamos de alguma forma controlar os efeitos externos. A diafonia, embora intrínseca à construção do cabo, pode ser mantida dentro de parâmetros de fabricação por meio de boas práticas de instalação. Em outras palavras, não há como melhorar a resposta de diafonia por meio de práticas de instalação, mas quando não observadas, ela pode ser prejudicada.

Considerações sobre acoplamento entre circuitos (ou canais)

Quando dois ou mais circuitos (ou canais) estão próximos, há “vazamento” de sinais entre eles, referidos como ruídos. Isso é devido aos acoplamentos entre os circuitos, que pode acontecer devido a um ou mais dos seguintes mecanismos:

- acoplamento condutivo;
- acoplamento capacitivo (devido ao campo elétrico);
- acoplamento indutivo (devido ao campo magnético);
- combinação de campos elétrico e magnético, algumas vezes referido na literatura técnica como acoplamento eletromagnético.

Acoplamento condutivo

Ocorre quando circuitos ou canais diferentes têm um ramo comum, conforme mostrado na Figura 4.

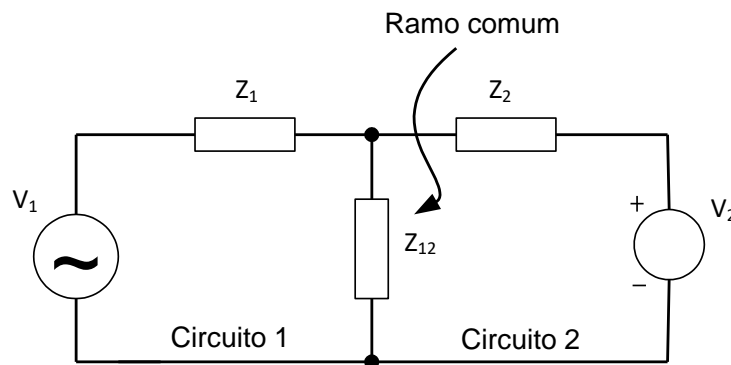


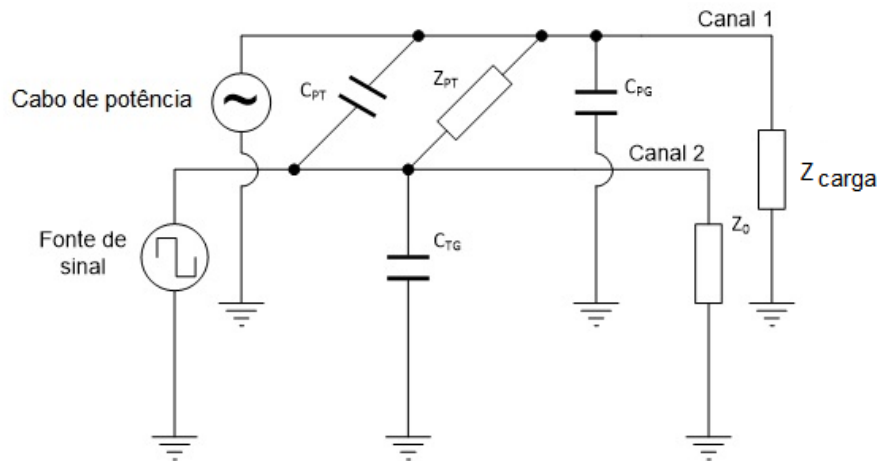
Figura 4 – Exemplo de acoplamento condutivo

Na prática, o acoplamento condutivo ocorre com certa frequência entre dois canais ou circuitos (como os circuitos 1 e 2 na Figura 4) que usam o plano de terra como condutor elétrico (configuração de modo comum). Embora esse tipo de acoplamento seja bastante comum e importante do ponto de vista de interferência causada por circuitos de potência nos canais de telecomunicações, o acoplamento condutivo não é parte do mecanismo de interferência eletromagnética. Na Figura 4, o circuito 1 é de potência e o circuito 2, de telecomunicações.

Acoplamento capacitivo

O acoplamento capacitivo ou acoplamento por campo elétrico, conforme mostrado na Figura 5, ocorre entre cabos de potência e cabos de telecomunicações instalados paralelamente ao longo de um percurso em um dado caminho. Quanto maior o percurso de carregamento paralelo, maior o efeito do acoplamento capacitivo.

É importante enfatizar que, embora representado na Figura 5 entre circuitos de potência e telecomunicações, esse efeito não ocorre apenas entre esses sistemas, mas igualmente entre dois ou mais cabos de potência e entre dois ou mais cabos de telecomunicações em carregamento paralelo.



Nota: o acoplamento capacitivo ocorre entre cabos de sistemas diferentes e entre cabos de sistemas similares.

Figura 5 – Exemplo de acoplamento capacitivo

Embora a análise do circuito mostrado na Figura 5 não seja objeto deste artigo e, portanto, não entrarei em detalhes sobre cada elemento apresentado, é importante dedicar atenção a capacitância C_{PT} (capacitância entre o circuito de potência e o de telecomunicações), pois o acoplamento de ruído entre os dois circuitos representados será maior quanto maior for o valor dessa capacitância. A distância entre os circuitos envolvidos no mecanismo de acoplamento afeta o valor de C_{PT} , que será menor quanto maior a separação entre eles.

Normalmente a separação entre dois condutores é especificada em termos de seus diâmetros (há estudos em literatura² especializada sobre isso).

Acoplamento indutivo

Ocorre devido à indutância mútua entre dois ou mais canais, conforme mostrado na Figura 6.

²Noise Reduction Techniques in Electronic Systems, Henry Ott – John Wiley & Sons, 1988.

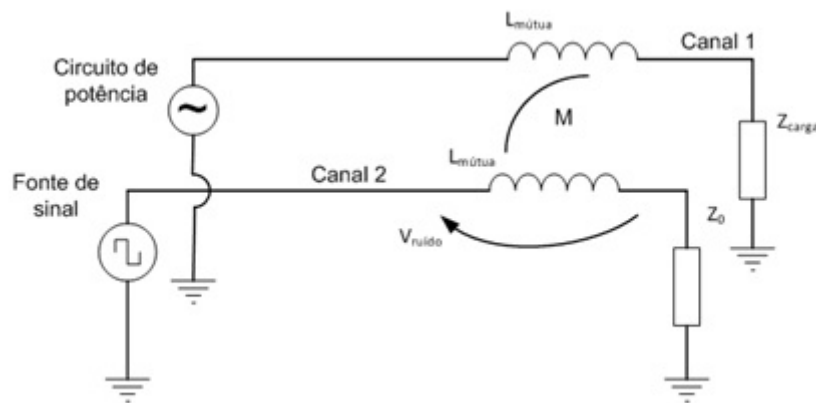


Figura 6 – Exemplo de acoplamento indutivo

A indutância mútua ($L_{mútua}$) entre dois canais é responsável pelo acoplamento indutivo entre eles. Quando uma corrente flui por um circuito (interferente) terminado com uma impedância de carga (uma placa de rede ou uma porta de switch, por exemplo), ela produz um fluxo magnético proporcional a essa corrente. Esse fluxo magnético induz uma tensão de ruído ($V_{ruído}$) no circuito interferido que vai gerar uma corrente de modo comum que também será responsável pela introdução de ruído adicional no circuito interferido.

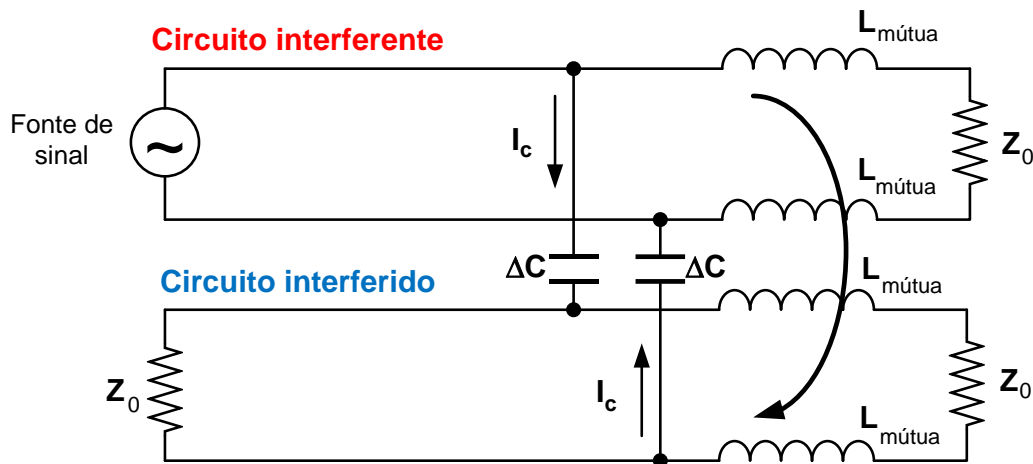
O acoplamento indutivo ou magnético é um dos principais responsáveis pelo acoplamento de diafonia entre canais de transmissão. Técnicas eficientes para a redução da interferência por acoplamento indutivo entre canais são a separação entre eles (quanto maior a separação, menor a interferência) e a manutenção da geometria dos condutores do cabo de transmissão de sinais ao longo de sua extensão. É importante considerar que a intensidade do campo magnético é diretamente proporcional à intensidade da corrente elétrica que o produz e inversamente proporcional à distância entre os canais interferente e interferido.

Efeitos combinados

Nos itens anteriores analisamos os mecanismos de acoplamento condutivo, capacitivo (por campo elétrico) e indutivo (por campo magnético) isoladamente. Em instalações reais, esses mecanismos se apresentam de forma combinada, mesmo que em muitos casos um seja mais significativo que o outro, dependendo de algumas condições técnicas e ambientais.

Diafonia (crosstalk) propriamente dita

A diafonia ocorre devido aos mecanismos de acoplamento indutivo e capacitivo apresentados anteriormente e é o maior fator limitativo de desempenho em sistemas de comunicação que utilizam cabos balanceados como meio de transmissão. A Figura 7 mostra um esquema simplificado dos acoplamentos causadores da diafonia.



Nota: ΔC é o desequilíbrio capacitivo entre ambos os pares representados na figura.

Figura 7 – Modelo simplificado de acoplamentos que causam a diafonia

A diafonia pode ser entendida como a interferência eletromagnética entre sinais (digitais ou analógicos) que se propagam por diferentes pares dentro de um cabo balanceado com ou sem blindagem. Essa interferência entre dois pares em um cabo U/UTP (cabos balanceados sem blindagem) ou F/UTP (cabos balanceados sem blindagem individual de pares cobertos por uma blindagem geral tipo folha) depende de vários fatores, entre eles os aspectos construtivos do cabo, como bitola dos condutores, passo de torção (intervalos entre os quais os condutores são trançados em relação ao seu eixo longitudinal), material empregado no dielétrico e simetria (elétrica) entre os pares.

A interferência por diafonia não pode ser eliminada, mas é controlada no processo de fabricação do cabo e, durante a instalação pode ter seu desempenho garantido pelo uso de boas práticas. Pela própria natureza da indutância mútua, que apresenta uma variação muito ampla em torno de seu valor teórico nominal, esse parâmetro não é especificado pelo fabricante do cabo exatamente por não poder ser controlado. A capacitância mútua, por outro lado, tem seu valor especificado pelo fabricante e pode ser controlada no processo de fabricação. Esse parâmetro é otimizado, o que resulta em uma tendência de valores mais baixos quanto mais alta a categoria de desempenho do cabo. Quanto menor o valor desse parâmetro, menor o acoplamento capacitivo e, portanto, maior a isolamento do par para interferência por diafonia.

Uma preocupação especial é dispensada aos efeitos da diafonia, bem como seu controle em sistemas de cabeamento estruturado. A diafonia (*crosstalk*) pode ser medida a partir de dois referenciais:

- na extremidade do canal na qual se encontra a fonte causadora do ruído, e
- na extremidade oposta àquela na qual se encontra a fonte causadora do ruído.

Conforme mencionado na introdução deste artigo, não há tipos diferentes de diafonia, ou seja, a diafonia é um efeito único que pode ser avaliado com relação a referenciais diferentes. A diafonia medida na extremidade do canal onde se encontra a fonte causadora de ruído é identificada como paradiafonia. O prefixo grego 'para' significa próximo. Em inglês, a paradiafonia é identificada pela abreviatura NEXT (*near-end crosstalk*), que expressa a interferência (ruído) por diafonia acoplada ao canal próximo (*near*) àquele no qual se encontra a fonte causadora dessa interferência.

A diafonia medida na extremidade oposta do canal em relação àquela em que se encontra a fonte de ruído é identificada como telediafonia. O prefixo grego 'tele' significa distante. Em inglês, a telediafonia é identificada com a abreviatura FEXT (*far-end crosstalk*), que expressa a interferência (ruído) por diafonia acoplada ao canal distante (*far*) daquele no qual se encontra a fonte causadora dessa interferência.

A Figura 8 esquematiza a diafonia medida com base em ambos os referenciais para um cabo balanceado de quatro pares.

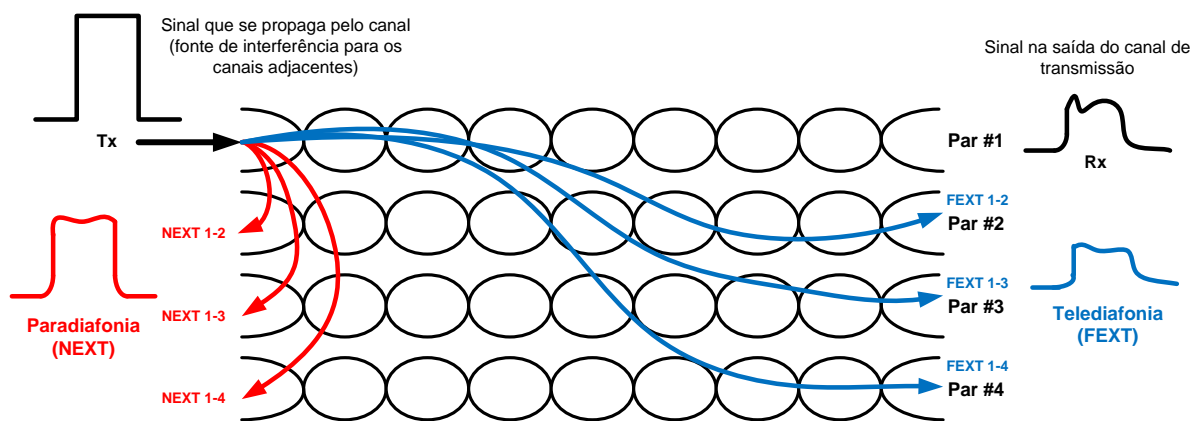


Figura 8 – Mecanismos de interferência por diafonia (NEXT e FEXT)

Conforme mostrado na Figura 8, o sinal aplicado a entrada do canal (par #1), proveniente de um equipamento ativo de rede (operando como transmissor) e que carrega informação digital que precisa ser recebida e decodificada por outro equipamento ativo na extremidade oposta do canal (operando como receptor), também funciona como a fonte de interferência causadora de ruído por diafonia acoplado aos canais (ou pares) adjacentes. O ruído acoplado em pares adjacentes na mesma extremidade onde o sinal é aplicado é referido como paradiafonia (NEXT). Da mesma forma, o ruído acoplado em pares adjacentes na extremidade oposta àquela na qual o sinal é aplicado, é referido como telediafonia (FEXT). Nessa figura são representadas as interferências por diafonia entre os pares 1-2, 1-3 e 1-4.

Aproveitando o esquema da Figura 8, concluímos que a paradiafonia não está sujeita ao comprimento do canal, pois se trata de uma interferência local. Por outro lado, a telediafonia está sujeita a extensão do canal e se trata, portanto, de uma interferência remota. Por esse motivo, relações entre a telediafonia e a atenuação do par interferido são importantes para a especificação dos limites de desempenho do canal em cabeamento estruturado.

Em resumo, isso é diafonia, nada mais, nada menos. É o efeito de “linha cruzada” mencionado no início deste artigo. Embora a análise dos mecanismos de interferência requiera a aplicação de ferramentas matemáticas de certa complexidade, o efeito físico em si é bastante simples de ser compreendido.

Conforme representado no esquema da Figura 3, a diafonia afeta de maneira significativa o desempenho do sistema de comunicação, contribuindo para a degradação do canal. Por esse motivo, seu controle é fundamental e sua avaliação em testes de campo é necessária e um requisito de normas técnicas. A seguir, vamos conhecer as metodologias de teste da diafonia.

Metodologias de teste de diafonia

Há, basicamente, duas metodologias de teste de diafonia especificadas por normas técnicas:

- testes par a par;
- teste de soma de potências de ruído acoplado ao canal, referido como *powersum*.

O teste par a par avalia a interferência entre pares individuais dentro de um segmento de cabo balanceado de quatro pares. Em outras palavras, a fonte de sinal é aplicada em cada um dos pares e sua interferência avaliada nos demais pares individualmente. A Figura 9 mostra esse mecanismo.

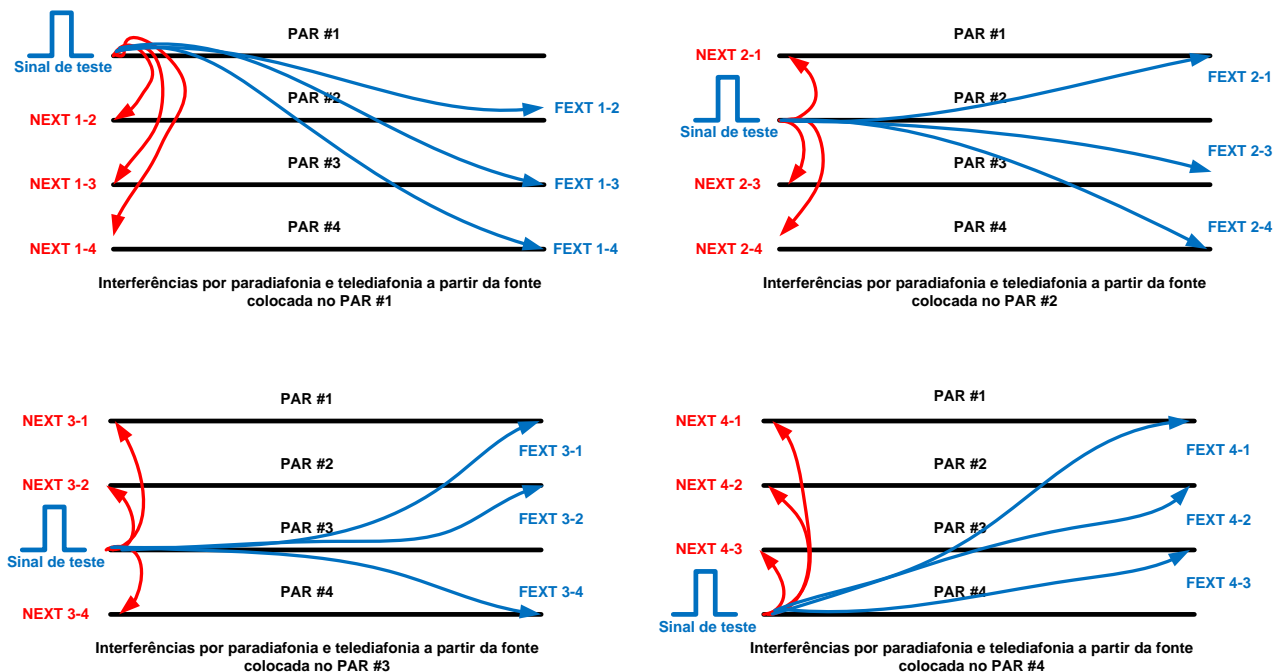


Figura 9 – Metodologia de teste de paradiafonia e telediafonia par a par

Portanto, para cabos balanceados de quatro pares, há seis combinações de NEXT e FEXT par a par:

- a. NEXT₁₋₂, FEXT₁₋₂
- b. NEXT₁₋₃, FEXT₁₋₃
- c. NEXT₁₋₄, FEXT₁₋₄
- d. NEXT₂₋₃, FEXT₂₋₃
- e. NEXT₂₋₄, FEXT₂₋₄
- f. NEXT₃₋₄, FEXT₃₋₄

É importante explicar que, por se tratar de efeitos resultantes de indutância e capacitância mútuas, temos que NEXT₁₋₂ = NEXT₂₋₁, NEXT₁₋₃ = NEXT₃₋₁, NEXT₂₋₃ = NEXT₃₋₂, NEXT₂₋₄ = NEXT₄₋₂, NEXT₃₋₄ = NEXT₄₋₃, NEXT₄₋₁ = NEXT₁₋₄, NEXT₄₋₂ = NEXT₂₋₄ e NEXT₄₋₃ = NEXT₃₋₄. As mesmas relações de aplicam às combinações de testes de FEXT. Isso explica porque são seis as combinações de interesse de relações de NEXT e FEXT.

O teste *powersum* avalia a interferência acoplada em um par como função das fontes de ruído colocadas nos demais pares, conforme mostrado na Figura 10.

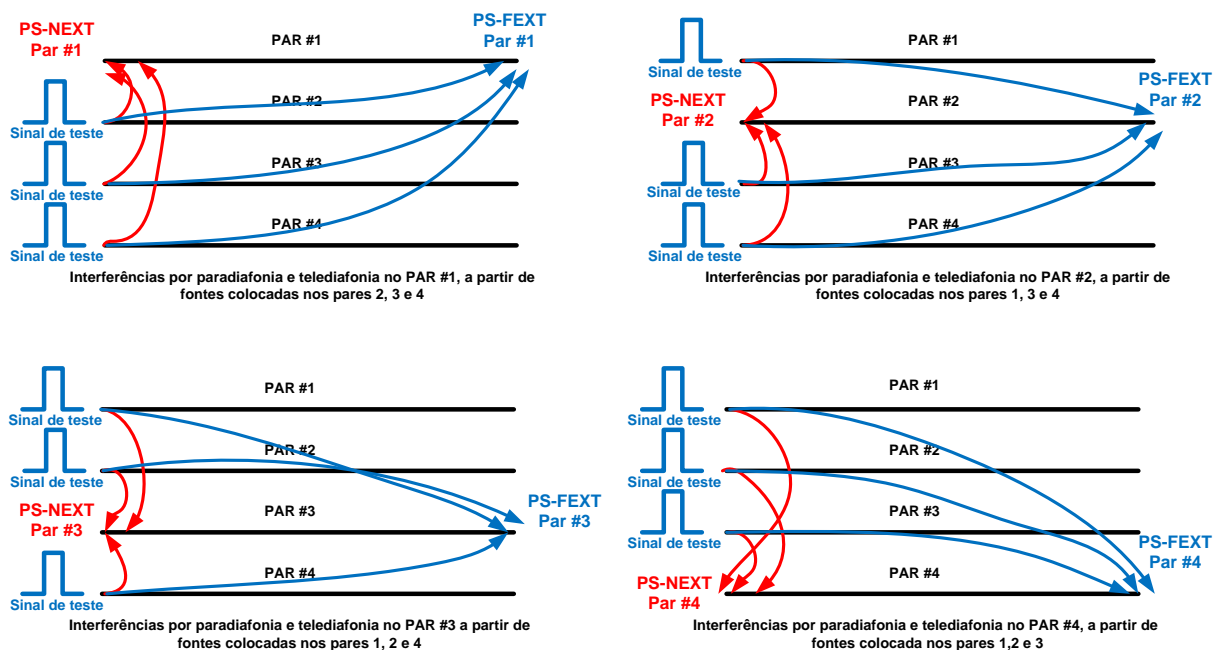


Figura 10 – Metodologia de teste de paradiáfonia e telediafonia *powersum*

Portanto, para cabos balanceados de quatro pares, há quatro combinações de NEXT e FEXT *powersum*:

- a. PS-NEXT_{Par1}, PS-FEXT_{Par1}

- b. PS-NEXT_{Par2}, PS-FEXT_{Par2}
- c. PS-NEXT_{Par3}, PS-FEXT_{Par3}
- d. PS-NEXT_{Par4}, PS-FEXT_{Par4}

O leitor pode estar se perguntando qual é o motivo pelo qual há duas metodologias de teste de diafonia.

Na verdade, isso tem relação com as características das aplicações que podem ser implementadas em cabeamento estruturado, que deve estar preparado para qualquer que seja a aplicação, desde que em conformidade com a categoria de desempenho de cabos e *hardware* de conexão e classe de desempenho do cabeamento.

Por exemplo, para aplicações Ethernet “BASE-T” (Ethernet em cabos balanceados), como a 10BASE-T, ou seja, 10 Mb/s utilizando dois pares do cabo balanceado (ver Figura 11), a avaliação da resposta do canal para as interferências por diafonia par a par é o suficiente para garantir o desempenho especificado dessa aplicação.

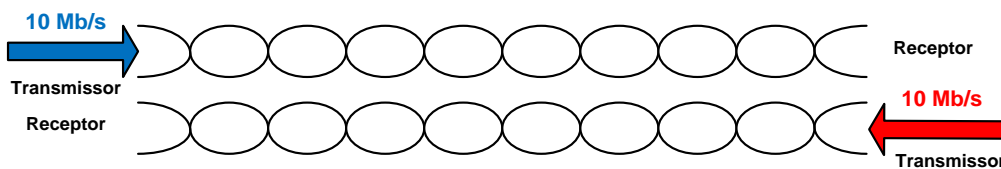


Figura 11 – Mecanismo de transmissão da aplicação 10BASE-T

A aplicação 10BASE-T opera em modo *half-duplex*, ou seja, utiliza um canal para transmissão, no ciclo de transmissão e outro para recepção, no ciclo de recepção. Portanto, quando um canal (par do cabo balanceado) está em uso, o outro está ocioso. Nesse tipo de sistema, interferências por diafonia são pouco expressivas, porém um teste de diafonia ajuda a identificar, por exemplo, um componente com defeito ou uma conexão malfeita.

Da mesma forma, para aplicações que operam em modo *full-duplex*, como a 1000BASE-T (Gigabit Ethernet) por exemplo (ver Figura 12), requerem que a resposta do canal para diafonia seja avaliada por meio de testes *powersum*.

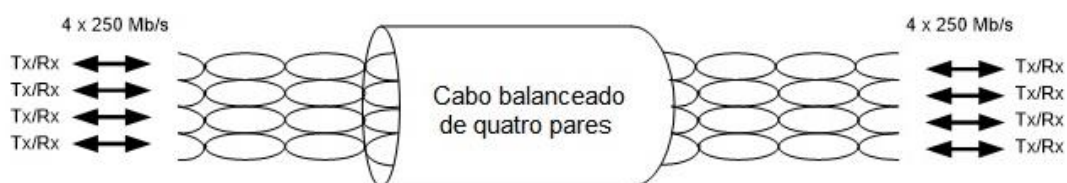


Figura 12 – Mecanismo de transmissão da aplicação 1000BASE-T

A aplicação 1000BASE-T opera em modo *full-duplex*, ou seja, utiliza todos os quatro pares para transmissão e recepção no mesmo ciclo de comunicação. Nesse caso, todos os pares

geram ruídos que são acoplados mutuamente e degradam a qualidade de todos os pares do cabo.

A avaliação desses e outros parâmetros de transmissão é feita por meio de testes de certificação de campo do cabeamento estruturado instalado. Os limites para aprovação ou rejeição dos resultados obtidos nesses testes são determinados por normas técnicas específicas com base na classe de desempenho do cabeamento (classe D, E, E_A, F etc.).

Alien crosstalk

Em instalações reais, os segmentos de cabos balanceados são instalados em feixes ao longo dos caminhos e espaços em edifícios, de modo que pares adjacentes de cabos próximos interferem mutuamente quando não blindados (U/UTP). Essa interferência é denominada *alien crosstalk*, conforme mostrado na Figura 13.

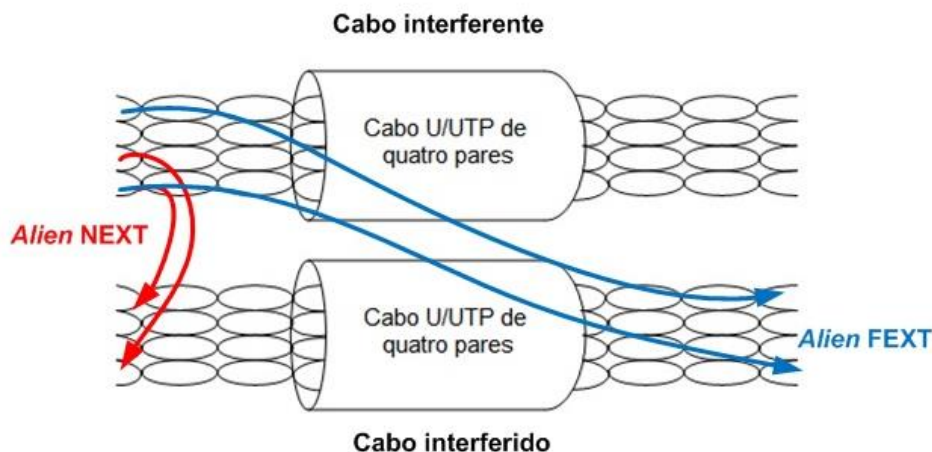


Figura 13 – Esquema de interferência por *alien crosstalk*

Como esses cabos não possuem blindagem, sinais que se propagam em pares de um cabo podem interferir em sinais que se propagam em pares de cabos adjacentes no mesmo feixe ou grupo de cabos. Embora a figura mostre algumas relações de interferência por diafonia, como o *alien NEXT* (ANEXT) e o *alien FEXT* (AFEXT), as mesmas metodologias de testes para a par e *powersum* se aplicam.

As normas de cabeamento estruturado levam esse efeito em consideração e estabelecem limites para testes de *alien crosstalk*. Esse efeito e seu controle se tornam mais importantes em sistemas de cabeamento estruturado devido às aplicações Gigabit Ethernet e 10 Gigabit Ethernet sobre cobre (10GBASE-T), pois nesses padrões todos os pares do cabo balanceado são utilizados simultaneamente, o que aumenta, potencialmente, o nível de interferência por diafonia entre pares de diferentes cabos quando cabos sem blindagem forem utilizados no canal.

O controle do *alien crosstalk* em sistemas de cabeamento estruturado é importante, pois os equipamentos ativos de TI, em geral, não são capazes de compensar o ruído externo proveniente dos cabos sob certas condições e limites bem específicos. Assim, é de fundamental importância que os efeitos de cabos adjacentes sejam minimizados nesses sistemas.

Bem, até aqui revisamos os parâmetros primários e secundários dos cabos balanceados, os mecanismos de acoplamento entre pares, causadores da interferência por diafonia e os métodos de medição dessa interferência. Em resumo, tudo o que importa sobre a diafonia (*crosstalk*) está aqui.

Para finalizar, vamos conhecer brevemente algumas relações importantes entre a diafonia e a atenuação, denominadas ACR (*attenuation to crosstalk ratio*, relação atenuação diafonia), incluindo suas variações.

Relação atenuação diafonia

De forma bastante objetiva, trata-se da diferença (em dB) entre a diafonia em um determinado par e a atenuação desse par.

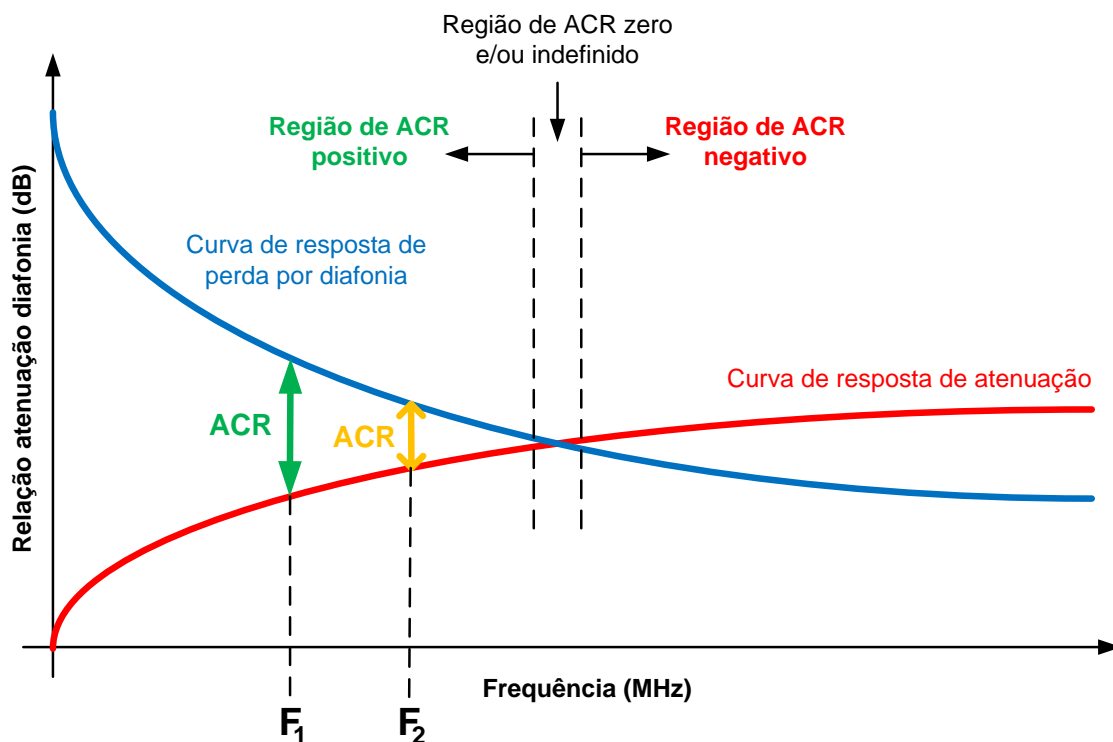


Figura 14 – Relação atenuação diafonia (ACR)

No esquema da Figura 14 vemos uma representação gráfica da relação atenuação diafonia (ACR). É importante enfatizar que essa representação é apenas didática e não se trata da amostragem de um resultado de resposta de ACR medido para um determinado par do cabo balanceado.

Aproveitando, também é importante explicar que a curva de diafonia se refere à perda por diafonia ($NEXT_{loss}$), ou seja, a isolamento entre pares em relação a interferência por diafonia, que diminui à medida que a frequência aumenta, conforme mostrado na Figura 14. A redução da isolamento elétrica devida a diafonia implica que o acoplamento de ruído no canal aumenta.

Note que quanto mais próximas as curvas em azul e vermelho no gráfico, menor é a distância entre elas, que é a relação atenuação diafonia. Portanto, o ACR na frequência F_1 (em verde) é maior (em dB) que o ACR na frequência F_2 (em laranja). Há três regiões de interesse no gráfico da Figura 14:

- ACR positivo:** região em que os valores de ACR são aceitáveis como indicadores de desempenho satisfatório do canal;
- ACR zero e/ou indefinido:** região em que os valores de ACR não são aceitáveis por serem muito próximos de zero (ou zero) e indicam que o desempenho do canal é insatisfatório;
- ACR negativo:** região em que ocorre a inversão das duas curvas e indica desempenho insatisfatório do canal.

Os limites de aceitação para esse parâmetro são especificados em normas técnicas e variam com a frequência.

Embora algumas vezes confundido com a relação sinal ruído (SNR, *signal to noise ratio*) em sistemas de comunicação, ACR e SNR não são a mesma coisa. A relação sinal ruído não pode ser avaliada para sistemas passivos, pois leva em consideração o mecanismo de codificação empregado no sistema de comunicação (MLT-3, PCM Manchester, 4D-PAM-5 etc.), que depende da aplicação utilizada.

Em outras palavras, é possível avaliar a relação sinal ruído para a aplicação 10GBASE-T, por exemplo, mas não é possível avaliar esse parâmetro para um canal de cabeamento estruturado. Assim, a relação atenuação diafonia avalia quanto cada um desses efeitos contribui para a degradação da qualidade de transmissão do canal.

Assim como a diafonia, o ACR é avaliado com base na referência na qual se encontra a fonte de ruído em ambas as metodologias: par a par e *powersum*, conforme veremos a seguir.

ACR-N (relação atenuação paradiafonia par a par)

Trata-se da diferença entre a paradiafonia (NEXT) par a par e a atenuação do par interferido, em dB. Por exemplo, o ACR-N entre os pares 1 e 2 de um cabo de quatro pares é a diferença entre o NEXT entre os pares 1 e 2 e a atenuação do par 2, conforme a expressão 1, abaixo:

$$ACRN_{12} = NEXT_{12} - A_2 \quad [1]$$

Powersum ACR-N (relação atenuação paradiafonia powersum)

Trata-se da diferença entre a paradiafonia (NEXT) powersum e a atenuação do par interferido, em dB. Por exemplo, o PS-ACR-N no par 1 de um cabo de quatro pares é a diferença entre o PS-NEXT no par 1 e a atenuação do par 1, conforme a expressão 2, abaixo:

$$PSACRN_1 = PSNEXT_1 - A_1 \quad [2]$$

ACR-F (relação atenuação telediafonia par a par)

Trata-se da diferença entre a telediafonia (FEXT) par a par e a atenuação do par interferido, em dB. Por exemplo, o ACR-F entre os pares 1 e 2 de um cabo de quatro pares é a diferença entre o FEXT entre os pares 1 e 2 e a atenuação do par 2, conforme a expressão 3, abaixo:

$$ACRF_{12} = FEXT_{12} - A_2 \quad [3]$$

Powersum ACR-F (relação atenuação telediafonia powersum)

Trata-se da diferença entre a telediafonia (FEXT) powersum e a atenuação do par interferido, em dB. Por exemplo, o PS-ACR-F no par 1 de um cabo de quatro pares é a diferença entre o PS-FEXT no par 1 e a atenuação do par 1, conforme a expressão 4, abaixo:

$$PSACRF_1 = PSFEXT_1 - A_1 \quad [4]$$

As expressões 1 a 4 são simplificações dos métodos de cálculo das relações entre atenuação e diafonia, porém são suficientes para o propósito deste artigo.

A interferência por diafonia (NEXT e FEXT) deve ser medida em ambas as extremidades do canal em testes de certificação do cabeamento. Da mesma forma, as relações entre a diafonia e a atenuação devem ser avaliadas para a aceitação do cabeamento instalado, seguindo as mesmas metodologias de testes de diafonia.

Alguns parâmetros são medidos em campo e outros são calculados com base em limites estabelecidos por normas técnicas. A Tabela 1 mostra os parâmetros envolvidos nos testes de certificação.

Tabela 1 – Especificação de parâmetros de transmissão e instalação para testes de campo

Parâmetros de transmissão e de instalação	Conformidade com testes de campo
Perda de retorno	N
Perda de inserção (atenuação)	N

Paradiafonia (NEXT) par a par	N
Paradiafonia <i>powersum</i> (PS-NEXT)	C
Relação atenuação paradiafonia (ACR-N) par a par	C
Relação atenuação paradiafonia (PS-ACR-N) <i>powersum</i>	C
Relação atenuação telediafonia (ACR-F) par a par	N
Relação atenuação telediafonia (PS-ACR-F) <i>powersum</i>	C
Resistência de laço em corrente contínua	N
Desequilíbrio resistivo para pares individuais	O
Desequilíbrio resistivo entre pares	O
Atraso de propagação	N
Desvio de atraso de propagação	N
Perda de conversão transversal (TCL)	O
Perda de transferência de conversão transversal de nível equalizado (ELTCTL)	O
Atenuação de acoplamento	O
<i>Alien</i> NEXT (PS-ANEXT) <i>powersum</i>	N _S
Média de <i>alien</i> NEXT (PS-ANEXT _{média}) <i>powersum</i>	C
Relação atenuação <i>alien</i> FEXT (PS-AACR-F) <i>powersum</i>	N _S
Média da relação atenuação <i>alien</i> FEXT (PS-AACR-F _{média}) <i>powersum</i>	C
Configuração de terminação de pares em tomadas e plugues (<i>wire map</i>)	N
Continuidade, blindagem (se aplicável), curto-circuito e circuito aberto	N
Comprimento	I
<p>Notas:</p> <p>C: é o valor calculado e é usado para aceitação em testes de campo</p> <p>I: é o valor informativo que não segue o critério para aceitação em testes de campo</p> <p>N: é o valor normativo para a aceitação em testes de campo</p> <p>N_S: é o valor normativo de amostragem para testes de campo</p> <p>O: indica que o parâmetro é opcional em testes de campo</p>	

A Tabela 1 utiliza como referência especificações da norma ISO/IEC 11801-1. Os parâmetros marcados como normativo (N) são medidos, os demais são derivados de cálculos ou estabelecidos mediante outros critérios.

Conclusões

Aprendemos neste artigo que a diafonia é o efeito de “linha cruzada” entre canais adjacentes e se trata da interferência eletromagnética que ocorre devido aos mecanismos de acoplamento indutivo e capacitivo entre pares de cabos balanceados.

Vimos também que não há diferentes tipos de diafonia, ou seja, trata-se de um efeito único que pode ser avaliado com base em referenciais distintos em função da localidade na qual se

encontra a fonte causadora desse efeito. Quando avaliada na mesma localidade da fonte, é referida como paradiáfonia (NEXT). Quando avaliada na extremidade oposta, é referida como telediafonia (FEXT). Esses efeitos podem ser medidos para combinações de pares individuais (par a par) ou a soma de potências de ruído pode ser avaliada (*powersum*). Os limites de desempenho para os testes de diafonia são estabelecidos com base nessas metodologias e servem para garantir, por meio da certificação, o desempenho de aplicações diversas no cabeamento genérico, ou seja, que deve apresentar um nível de desempenho predeterminado para sua categoria e classe de aplicação.

Vimos que relações entre a atenuação e a diafonia (ACR) são importantes para a determinação do desempenho do canal em condições críticas de degradação de sua qualidade, pois ambos os parâmetros contribuem para isso. Embora não seja o mesmo que a relação sinal ruído (que depende do código de linha empregado na aplicação), o ACR pode ser considerado como uma “figura da relação sinal ruído” de um sistema passivo, sendo o ruído representado pela interferência por diafonia.

A interferência por diafonia não pode ser eliminada, mas é controlada no processo de fabricação do cabo e pode ser mantida dentro de suas especificações no cabeamento instalado por meio de boas práticas de instalação. No processo de fabricação, o controle é obtido pelo material do dielétrico, passo de torção e sua manutenção ao longo do cabo e separação ótima entre os pares. Cada fabricante adota uma técnica própria para obter resposta ótima de diafonia. Em campo, o desempenho do cabo para a diafonia é obtido por meio da manutenção de suas características geométricas durante a instalação e a manutenção dos passos de torção na terminação dos condutores dos pares em *patch panels*, blocos de conexão, plugues e conectores.

Aprendemos que a interferência por diafonia pode ocorrer entre pares de cabos diferentes instalados em proximidade ao longo dos caminhos de cabos em uma instalação, referida como *alien crosstalk*. Dada a natureza dessa interferência, a técnica mais eficiente para eliminar o efeito do *alien crosstalk* é o uso de cabos blindados F/UTP (*foil-unshielded twisted-pair*) ou S/FTP (*screen-foil twisted-pair*), pois a blindagem é a única técnica capaz de eliminar os acoplamentos indutivo e capacitivo entre circuitos.

Referências

EAGER JR, G.S. et al. *Transmission properties of polyethylene-insulated telephone cables at voice and carrier frequencies*. AIEE Transactions in communications and electronics. November 1959.

MARDIGUIAN, Michel. *EMI Troubleshooting techniques*. First edition. New York: McGraw-Hill, Inc. 1999.

MARIN, Paulo S. Cabeamento estruturado – projeto e instalação. Primeira edição. São Paulo: PM Books Editora. 2015.

Dr. Paulo Marin, Eng^o. | IEEE Senior Member
Especialista em infraestrutura de TI e Telecom

OTT, Henry. *Electromagnetic compatibility engineering. First edition. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 2009.*

WAGGENER, B. *Pulse code modulation techniques with application in communications and data recording. First edition. New York: Van Nostrand Reinhold, Inc. 1995.*