

Entendendo a perda de retorno

Paulo S. Marin

Doutor em EMI/EMC aplicada à infraestrutura de TI

(Artigo publicado na revista RTI, Ano XXII, Nº 271, dezembro/2022)

A perda de retorno está entre os efeitos mais importantes que afetam a transmissão de sinais tanto em cabos metálicos quanto ópticos. Em geral, as reflexões são os problemas mais sérios em telecomunicações.

Neste artigo vou discutir a perda de retorno em cabos de cobre, suas características, causas, comportamento e como minimizar seus efeitos em instalações. Como esclarecimento, é comum encontrarmos a perda de retorno referida como RL (*return loss*) em equipamentos de testes em campo, literatura técnica, manuais, catálogos, etc. Ao longo deste artigo vou utilizar o termo em português.

A perda de retorno pode ser definida como a reflexão de um sinal que se propaga em um canal de transmissão devido ao descasamento de impedâncias neste canal. O sinal refletido retorna à sua fonte geradora em forma de ruído, de modo que uma parcela menor é entregue ao receptor, degradando, portanto, o desempenho do sistema de comunicação. Por isso, a perda de retorno deve ser controlada e mantida dentro de níveis adequados, conforme especificações de normas técnicas para cabos, *hardware* de conexão, *patch cords*, canais e enlaces permanentes.

A propósito, há vários fatores que afetam a transmissão de sinais em canais de transmissão, a saber:

- Atenuação (ver RTI, nº 268, 09/2022)
- Ruído de fundo e longitudinal
- Ruído impulso
- Ruído devido à perda de retorno
- Diafonia (ver RTI, nº 263, 05/2022)
- Atraso de propagação (ver RTI, nº 267, 08/2022)
- Interferência eletromagnética
- Distorção de fase
- *Jitter* (falha de sincronismo entre transmissor e receptor)

A Figura 1 apresenta um esquema de um sistema de comunicação incluindo os efeitos mencionados acima e as características intrínsecas do canal.

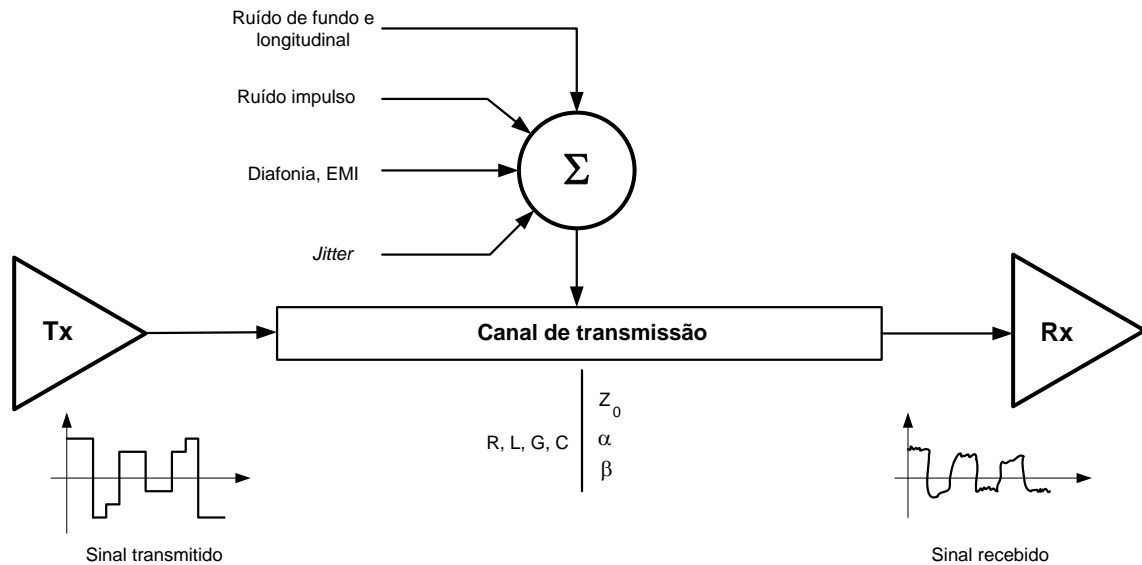


Figura 1 – Esquema de um sistema de comunicação e os efeitos que degradam a qualidade do canal de transmissão

O canal tem suas próprias características, representadas na figura por seus parâmetros primários (R, L, G e C) e secundários (impedância característica - Z_0 , atenuação - α , e deslocamento de fase - β). Os demais efeitos são provenientes de fontes externas, sejam elas os equipamentos ativos da rede, equipamentos e dispositivos operando no ambiente de instalação, práticas de instalação, etc.

Um efeito indesejado importante em comunicações digitais por cabos metálicos devido à perda de retorno é a introdução do *jitter* de fase, que indica que as bordas dos pulsos digitais variam aleatoriamente no tempo em torno de suas posições ideais. Esse efeito é responsável pela geração de atrasos não uniformes nos diversos componentes de frequência do pulso digital transmitido, conhecido como distorção de fase ou atraso de grupo que, conseqüentemente, é responsável pela interferência intersimbólica (ISI, *intersymbol interference*).

Na transmissão de um pulso digital, todos os componentes de frequência são atrasados uniformemente, mantendo uma relação de fase constante entre si. Quando ocorrem atrasos não lineares ao longo do canal devido ao *jitter*, as características do sinal recebido na outra extremidade do canal são muito diferentes daquelas transmitidas (no domínio do tempo), não sendo possível a detecção do sinal transmitido pelo circuito receptor, ou introduzindo erros de decodificação no sinal recebido. De forma bastante simples, a ISI ocorre quando há inversão de fase que, em comunicação digital significa que um "1" lógico pode ser interpretado como um "0" lógico e vice-versa.

Esse efeito é o principal fator limitativo de desempenho de sistemas VoIP (*voice over internet protocol*, voz sobre IP) em sistemas de cabeamento estruturado, que são sensíveis às

distorções de fase e atraso de propagação. Uma técnica bastante eficiente para a avaliação da ISI é o diagrama do olho, mostrado rapidamente na Figura 2.

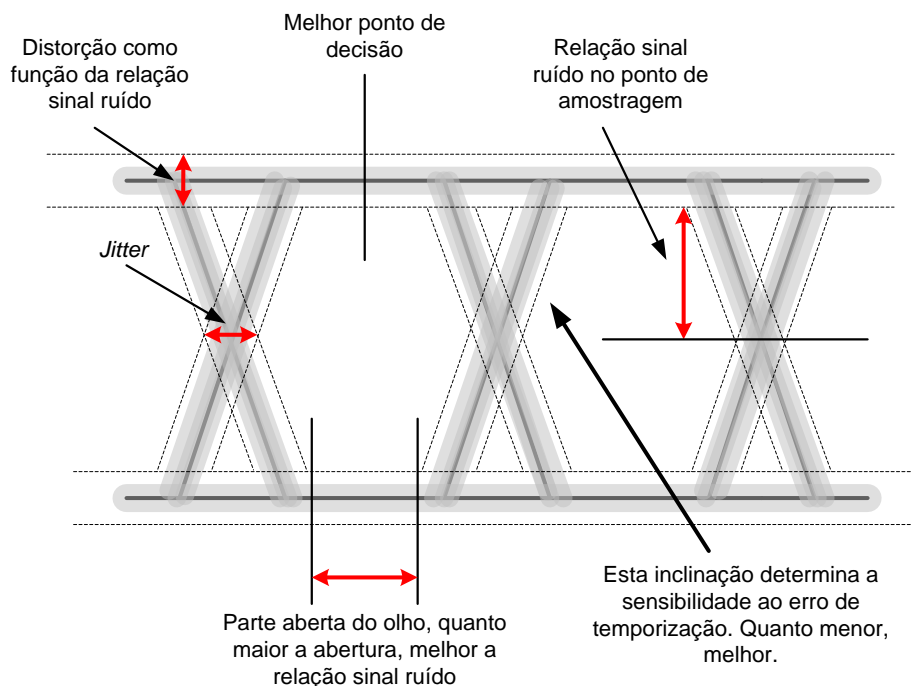


Figura 2 – Representação do diagrama do olho

O diagrama do olho é uma ferramenta bastante útil para a avaliação da interferência por distorção de fase, que tem relação direta com as reflexões e, portanto, com a perda de retorno. Quanto maior a abertura do olho, melhor a relação sinal ruído do canal. Um pouco mais adiante neste artigo, voltarei ao diagrama do olho e como ele se comporta em função do descasamento de impedâncias.

A perda de retorno varia sensivelmente com a frequência. Pequenas variações no valor da impedância característica ao longo do canal de transmissão afetam a perda de retorno. Por esse motivo, cabos e *hardware* de conexão de mesmas características elétricas devem ser utilizados em conjunto. Outra fonte de perda de retorno mais significativa na prática, é a qualidade dos serviços empregados na instalação, fator que afeta o desempenho do canal de transmissão de forma bastante importante. Em termos simples, o mau contato nas terminações é uma importante fonte de reflexões indesejadas e degradação do desempenho de transmissão do canal.

Portanto, em todas as localidades do canal de transmissão onde houver a introdução de conexões (e potencial para mau contato), haverá descasamento de impedâncias e reflexão de sinais, representada pela perda de retorno. Em outras palavras, interrupções no canal de transmissão causam perda de retorno. A Figura 3 mostra uma topologia de cabeamento estruturado com os pontos nos quais isso ocorre.

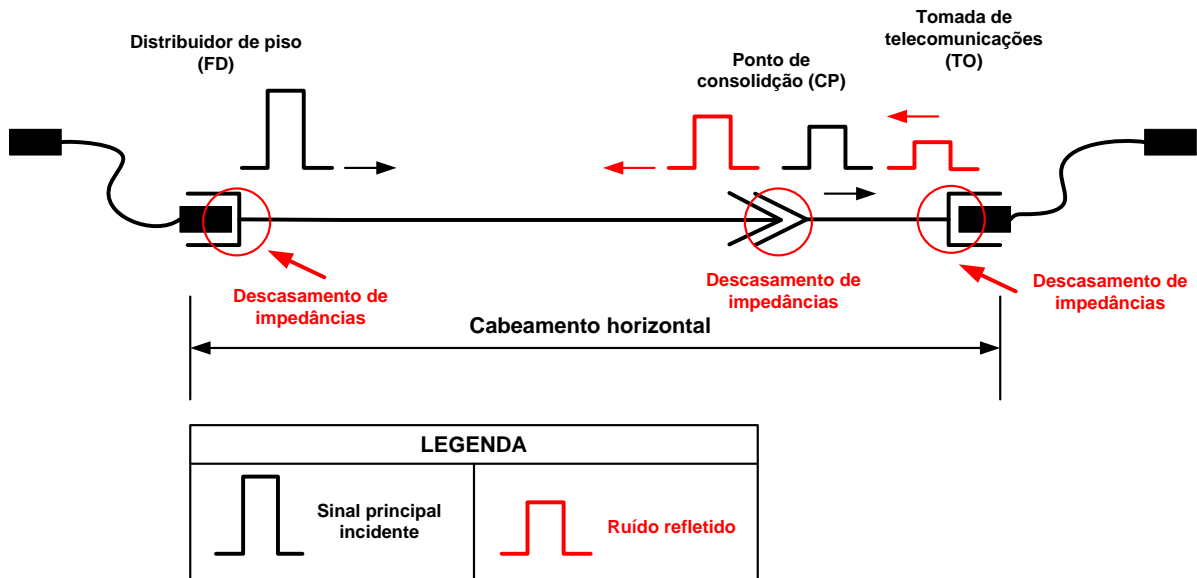


Figura 3 – Cabeamento horizontal e pontos de perda de retorno por descasamento de impedâncias

Avaliando somente a parte do cabeamento entre dois pontos bem definidos no canal (distribuidor de piso e tomada de telecomunicações na área de trabalho, por exemplo), onde há um transmissor (Tx) e um receptor (Rx), conforme representado na Figura 4, um canal com bom acoplamento apresenta baixa reflexão.

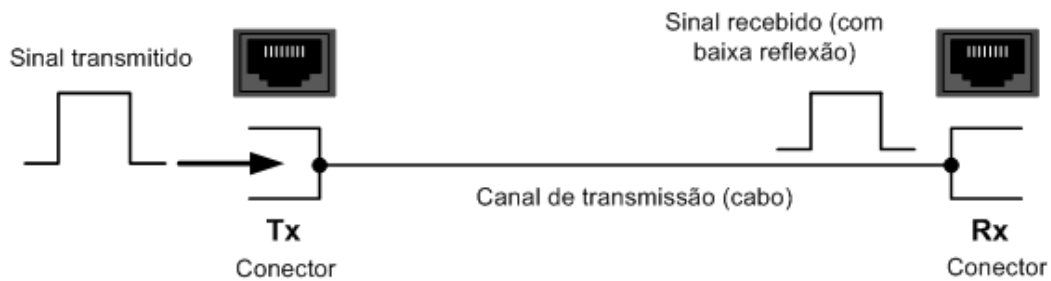


Figura 4 – Transmissão com baixa reflexão e bom desempenho de perda de retorno

No caso de uma terminação mal feita, na qual há mau contato, a amplitude de tensão do sinal entregue à extremidade onde se encontra o receptor é tão baixa que o sinal é interpretado como ruído, gerando um erro de comunicação, conforme mostrado na Figura 5.

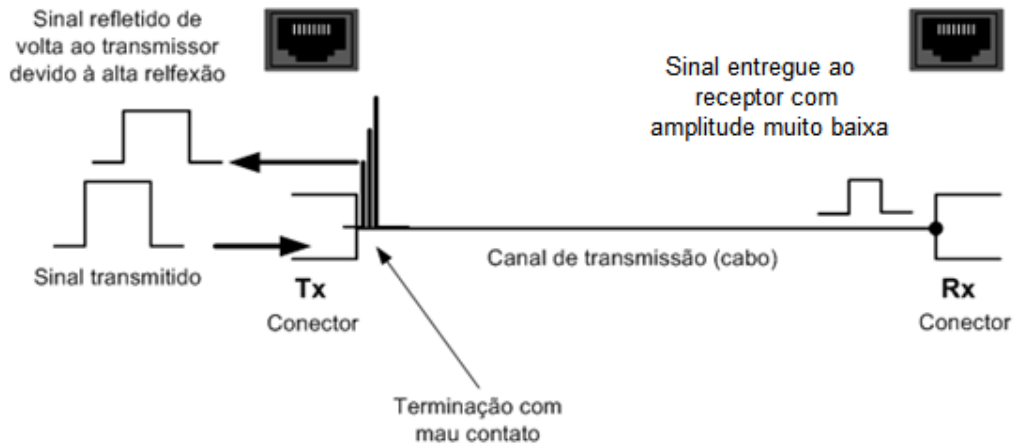


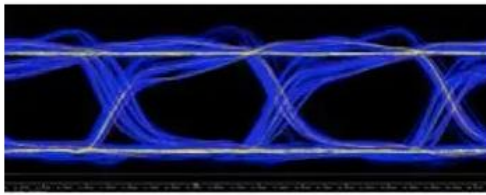
Figura 5 – Problema de comunicação devido a alta reflexão na terminação do lado do transmissor

As redes Ethernet são muito sensíveis a reflexões de modo que o instalador deve se assegurar que as terminações sejam de boa qualidade, o que é muito dependente da mão de obra e sempre realizar testes de certificação, que incluem o teste de perda de retorno. Este é o único parâmetro (entre os parâmetros avaliados na certificação do cabeamento) capaz de mostrar ao instalador que há um mau contato em alguma terminação quando isso ocorrer.

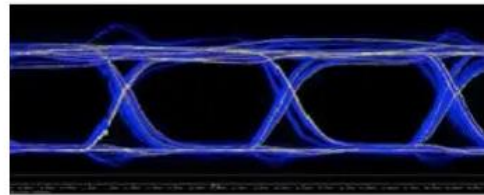
As normas técnicas de cabeamento estruturado não especificam que as conexões devem ser feitas com ferramentas e tampouco condenam conectores que são terminados sem o uso das clássicas ferramentas *punch-down*, aquelas que têm lâminas que, quando pressionadas contra o conector, fazem a terminação IDC dos condutores do cabo, aplicando um golpe mecânico e cortando o excesso dos condutores. Os componentes que podem ser terminados sem o uso de ferramentas específicas, identificados no mercado como *tool less* (sem ferramenta), são reconhecidos por normas técnicas de cabeamento.

Os valores das impedâncias nas terminações, ou seja, nos conectores que fazem a interface entre o cabeamento e os equipamentos ativos de rede devem ser iguais à impedância característica do canal de transmissão, dentro de certa tolerância, conforme especificado em normas técnicas. Um bom casamento entre a impedância característica do canal e a impedância característica da tomada que conecta o conector do equipamento ativo oferece boa transferência de potência no canal, minimizando as intensidades dos sinais refletidos.

Voltando ao diagrama do olho; a qualidade das terminações pode ser avaliada por meio dessa ferramenta, conforme mostrado na Figura 6.



a) Canal com terminação deficiente



b) Canal com terminação adequada

Figura 6 – Exemplos de diagrama do olho para canais com terminação deficiente (a) e adequada (b)

O diagrama do olho pode ser observado por meio de um osciloscópio no qual a base de tempo é sincronizada com a frequência de transmissão do canal e o sincronismo vertical com o sinal transmitido por ele. A base de tempo é normalmente limitada à largura de dois períodos de símbolo (ou períodos de bits) e o *trigger* do osciloscópio é acionado para iniciar a amostragem no centro dos picos (pontos de amostragem).

Conforme a discussão sobre o diagrama do olho e sua representação (ver Figura 2), vemos na Figura 6 que, quanto mais deficiente for a terminação do canal, representada pela influência do mau contato e descasamentos de impedâncias em suas terminações, mais fechado o olho será (ver Figura 6a). Da mesma forma, quanto melhor as terminações do canal, mais aberto o olho será (ver Figura 6b). Assim, conseguimos uma boa visualização da relação sinal ruído do canal em função da perda de retorno, entre outros fatores.

Para efeito de testes, a perda de retorno se trata da medição de todas as reflexões (analisadas sob um espectro de frequências) causadas por anomalias de impedância característica ao longo de um segmento de cabo, em decibel (dB).

A perda de retorno pode ser analisada por meio da relação entre a tensão do sinal refletido e a tensão do sinal incidente, devido aos descasamentos de impedâncias, ou por meio dos descasamentos de impedâncias propriamente ditos.

Portanto, com base no descasamento de impedâncias, a perda de retorno é função de quanto os valores de impedância característica ao longo de um canal se aproximam de seus valores nominais. Como exemplo, no caso do cabo balanceado de 100 Ω, esta é sua impedância nominal. Dessa forma, a perda de retorno pode ser determinada pela seguinte relação:

$$P_R = -20 \log \left(\left| \frac{Z_0 + Z_{0nom}}{Z_0 - Z_{0nom}} \right| \right) \quad [1]$$

Sendo,

Z_0 a impedância característica medida do canal (em Ω)

Z_{0nom} a impedância característica nominal (especificação) do canal (em Ω)

P_R a perda de retorno (em dB)

O sinal negativo na fórmula acima é para indicar que o valor calculado desse parâmetro representa uma perda.

Como sabemos, o mau contato nas conexões (ou terminações) em um canal de cabeamento estruturado leva ao descasamento de impedâncias. Do ponto de vista elétrico, o mau contato é representado como uma impedância muito elevada na conexão, tendendo ao infinito (teoricamente), ou ao circuito aberto na prática. Para exemplificar o efeito do descasamento de impedâncias e sua resposta em termos de perda de retorno, consideremos os casos exemplificados a seguir.

Caso 1 – Casamento de impedâncias ideal ($\Delta Z_0 = 1\%$)

Este caso representa um canal com terminações ideais, com desvio de impedância característica de 1%. É importante explicar que a impedância característica é um parâmetro que tem uma tolerância média típica de 15% em relação ao seu valor nominal. Portanto, o cenário representado aqui não poderia ser real.

$$Z_{0nom} = 100 \Omega$$

$$Z_0 \text{ (medida)} = 101 \Omega$$

$$P_R = -20 \log \left(\left| \frac{Z_0 + Z_{0nom}}{Z_0 - Z_{0nom}} \right| \right) = -20 \log \left(\frac{101+100}{101-100} \right) \cong 46 \text{ dB} \quad [2]$$

Caso 2 – Casamento de impedâncias aceitável ($\Delta Z_0 = 20\%$)

Este caso representa um canal com terminações aceitáveis (serviço bem feito), desvio de impedância característica realista e conexões casadas com componentes bem ajustados.

$$Z_{0nom} = 100 \Omega$$

$$Z_0 \text{ (medida)} = 120 \Omega$$

$$P_R = -20 \log \left(\left| \frac{Z_0 + Z_{0nom}}{Z_0 - Z_{0nom}} \right| \right) = -20 \log \left(\frac{120+100}{120-100} \right) \cong 20 \text{ dB} \quad [3]$$

Caso 3 – Casamento de impedâncias deficiente ($\Delta Z_0 \gg 100\%$)

Este caso representa uma conexão mal feita na qual há um mau contato muito importante. Eletricamente, ele pode ser interpretado como um circuito aberto, embora o efeito possa ser ainda pior na prática. De qualquer maneira, isso não será discutido em maiores detalhes neste artigo.

$$Z_{0nom} = 100 \Omega$$

$$Z_0 \text{ (medida)} = 10000 \Omega$$

$$P_R = -20 \log \left(\left| \frac{Z_0 + Z_{onom}}{Z_0 - Z_{onom}} \right| \right) = -20 \log \left(\frac{10000 + 100}{10000 - 100} \right) \cong 0,20 \text{ dB} \quad [4]$$

Quando analisada em função da reflexão de sinais, o que é feito na prática em testes de certificação em campo do cabeamento estruturado, o teste de perda de retorno mede a diferença entre a amplitude do sinal de teste e a amplitude das reflexões desse sinal ao longo do canal. Embora analisada com base em reflexão de sinais, os resultados do teste da perda de retorno indicam quão bem a impedância característica do canal corresponde aos seus valores nominais para uma dada faixa de frequências. A perda de retorno, como discutido extensivamente até aqui, é um fator limitante de desempenho de um sistema de comunicação digital.

A perda de retorno pode ser expressa, em termos de relações entre as tensões refletida e incidente, como:

$$P_R = -20 \log \left(\frac{V_r}{V_i} \right) \quad [5]$$

Sendo,

V_r a amplitude de tensão do sinal refletido (em V)

V_i a amplitude de tensão do sinal de teste incidente (em V)

P_R é a perda de retorno (em dB)

Para compreender melhor a resposta de perda de retorno em dB, consideremos uma reflexão de 5% em relação ao sinal de teste. Nesse caso, teremos uma perda de retorno de 26 dB, conforme mostrado na expressão abaixo.

$$P_R = -20 \log(0,05) = 26 \text{ dB} \quad [6]$$

Embora as melhores relações entre as tensões do sinal refletido e do sinal de teste sejam aquelas cujas reflexões sejam as menores possíveis, seus valores correspondentes em dB, são numericamente maiores. Em outras palavras, uma perda de retorno de 26 dB é melhor que uma perda de retorno de 20 dB.

A Tabela 1 mostra relações entre os níveis das reflexões (em relação ao sinal de teste) e os valores de perda de retorno correspondentes.

Tabela 1 – Perda de retorno em função da porcentagem do sinal refletido

Nível de reflexão	Perda de retorno
1%	40 dB
5%	26 dB
10%	20 dB
20%	14 dB
30%	10 dB
50%	6 dB
100%	0 dB

Com base na Tabela 1, o leitor pode estar se perguntando qual é um bom valor para esse parâmetro em sistemas de cabeamento estruturado. Isso é o que discutiremos a seguir.

A perda de retorno e as classes de cabeamento

Conforme mencionado no início deste artigo, a perda de retorno varia sensivelmente ao longo de uma faixa de frequências. Esse comportamento é representado na curva mostrada na Figura 7 para um canal classe E, dentro de uma faixa de frequências entre 1 MHz e 250 MHz, de acordo com especificações das normas ISO/IEC 11801:2017 e ABNT NBR 14575:2019.

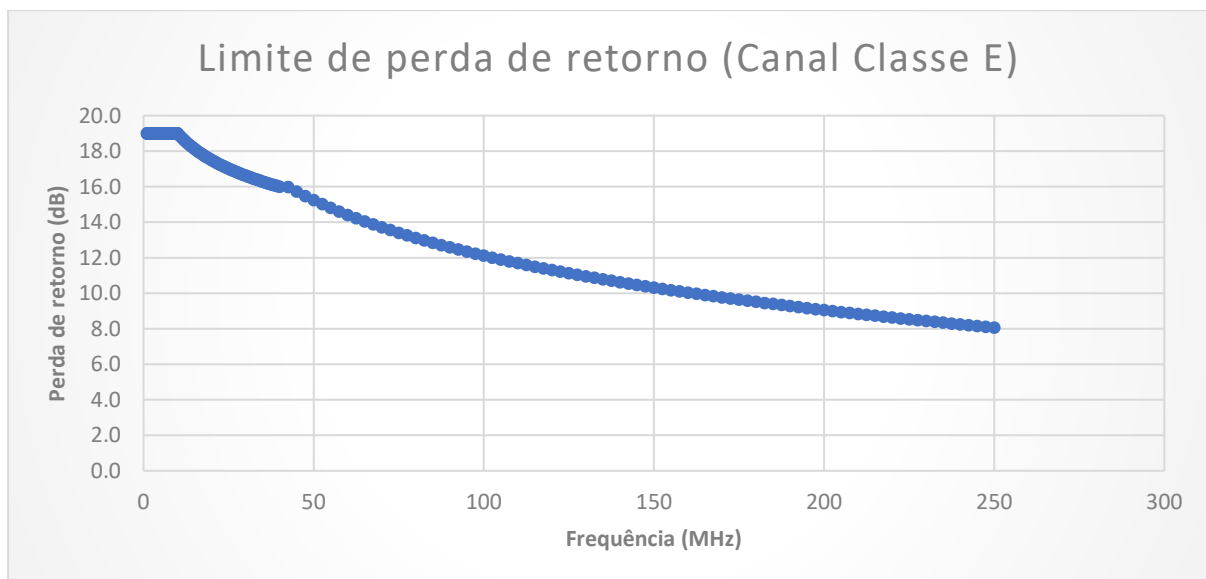


Figura 7 – Limite de perda de retorno para um canal classe E

Podemos notar na Figura 7 que a perda de retorno apresenta um comportamento linear para uma pequena faixa de frequências (até 10 MHz), com decaimentos importantes, 3,0 dB entre 10,5 MHz e 40 MHz, e 8,0 dB entre 40,5 MHz e 250 MHz. Como a curva é logarítmica, a melhor forma de analisar esse comportamento é recorrendo à informação da Tabela 1.

Daí vemos que até 10 MHz, a taxa de reflexão do sinal transmitido deve estar próximo a 10% (19,0 dB), até 40 MHz a reflexão aumenta para 18% (15 dB), chegando a 40% (8,0 dB) em 250 MHz.

Como lembrete, enquanto os componentes do cabeamento são especificados por suas categorias de desempenho (categoria 5e, categoria 6, categoria 6A, categoria 7, etc.), o cabeamento (que é a associação de cabos e componentes para formar canais) é especificado por sua classe de aplicação (classe D, classe E, classe E_A, classe F, etc.). A Tabela 2 resume as categorias de desempenho e as classes de aplicação.

Tabela 2 – Categorias e classes do cabeamento

Frequência máxima (MHz)	Categoria de desempenho de componentes individuais	Classe do cabeamento (cabo + componentes)
100	Cat. 5e	Classe D
250	Cat. 6	Classe E
500	Cat. 6A	Classe E _A
600	Cat. 7	Classe F
1000	Cat. 7A	Classe F _A
2000	Cat. 8.1 (Classe I) Cat. 8.2 (Classe II)	

A especificação de perda de retorno mostrada na Figura 7 é para o modelo de teste de canal. É importante lembrar que os limites para os testes de certificação em campo do cabeamento estruturado (que é um requisito de normas técnicas para todo sistema de cabeamento instalado) são determinados com base em dois modelos de testes básicos: enlace permanente e canal. Para conhecimento, há outros modelos definidos em normas para topologias e aplicações específicas.

Para finalizar a discussão sobre esse importante efeito que é a perda de retorno, o leitor pode estar se perguntando como avaliar qual é o melhor valor para esse parâmetro em um teste de certificação do cabeamento. Bem, com base em tudo o que foi exposto neste artigo, não há como conhecer esse valor, ou melhor dizendo, não é possível que um valor seja adotado como padrão, pois isso vai depender da faixa de frequências considerada. Como referência, a Tabela 3, derivada da norma ISO/IEC 11801:2017, apresenta valores mínimos de perda de retorno especificados para frequências críticas, para cada classe de cabeamento.

Tabela 3 – Valores de perda de retorno em frequências críticas
(Fonte: ISO/IEC 11801:2017)

Freq. (MHz)	Perda de retorno mínima (dB)						
	C	D	E	E _A	F	F _A	Classe I Classe II
1	15,0	17,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0
16	15,0	17,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0
100	-	10,0	12,0	12,0	12,0	12,0	16,0
250	-	-	8,0	8,0	8,0	8,0	13,4
500	-	-	-	8,0	8,0	8,0	10,7
600	-	-	-	8,0	8,0	8,0	10,0
1000	-	-	-	-	-	8,0	8,0
2000	-	-	-	-	-	-	6,2

Conclusões

Neste artigo, eu apresentei resumidamente os fatores que afetam a transmissão de sinais em canais de transmissão e coloquei o foco nos efeitos das reflexões, representadas pela perda de retorno.

Discutimos os métodos de avaliação da perda de retorno, que podem ser o descasamento de impedâncias ao longo do canal ou a medição do sinal refletido com base em um sinal de teste com características bem definidas. Este é o método utilizado nos testes de certificação em campo do cabeamento instalado.

Vimos que as reflexões (representadas pela perda de retorno) são fontes de *jitter* de fase, que por sua vez, distorce os sinais que se propagam pelo canal levando a interferência intersimbólica (ISI) e consequentes falhas de comunicação em sistemas digitais. Uma ferramenta eficiente para a avaliação desse efeito nesses sistemas é o diagrama do olho, discutido ao longo do artigo.

Analisamos os pontos no cabeamento estruturado onde as reflexões ocorrem. Esses pontos são todos aqueles nos quais há conexões e terminações. Vimos que os descasamentos de impedâncias nesses pontos são os responsáveis pelo desempenho do canal quanto a perda de retorno. Na prática, conexões e terminações mal feitas, ou seja, o mau contato é o principal fator que prejudica a perda de retorno e a qualidade do canal de forma global. Portanto, uma forma simples e eficaz para se obter bom desempenho para perda de retorno é o uso de mão de obra qualificada nas instalações assim como ferramentas, cabos e componentes de boa qualidade e bem ajustados para configurar as conexões casadas.

Para finalizar, avaliamos o comportamento da perda de retorno com base em limites estabelecidos por normas técnicas para diferentes classes de cabeamento. Como a perda de retorno varia com a frequência, valores mínimos estabelecidos para frequências críticas foram revisados aqui para referência.

Em resumo, a perda de retorno é um dos efeitos mais importantes em sistemas de comunicação e deve ser controlado no processo de fabricação de cabos e componentes da infraestrutura de cabeamento, assim como no projeto do canal, por meio da especificação de cabos e componentes fabricados para acoplamento ótimo em conexões casadas.

No processo de instalação, o instalador deve cumprir com os requisitos e recomendações do fabricante do sistema de cabeamento quanto ao método de terminação (“conectorização”), ferramentas, cuidados, etc. de modo a garantir a melhor continuidade elétrica em conexões e terminações.

Por apresentar um comportamento dependente da frequência, ou seja, quanto maior a frequência, pior a resposta para a perda de retorno, atenção especial deve ser dispensada ao processo de instalação do cabeamento. Isto é especialmente crítico para aplicações que têm requisitos de largura de banda mais ampla, como Ethernet a 10 Gb/s (10GBASE-T), a 25 Gb/s (25GBASE-T), a 40 Gb/s (40GBASE-T, entre outras. Além disso, aplicações PoE (*power over Ethernet*) são bastante dependentes de conexões bem feitas, com acoplamento ótimo e, portanto, baixas reflexões (altas perdas de retorno, em dB). Nesses casos, mais que afetar o bom desempenho de transmissão, o mau contato causa perdas importantes na entrega de alimentação em corrente contínua pelo cabeamento estruturado e danos físicos permanentes a tomadas e conectores.