

Interferência entre sinais de diferentes naturezas em sistemas de cabeamento estruturado

Paulo Sérgio Marin, Dr., Eng^o.
paulo_marin@paulomarinconsultoria.eng.br

Resumo- Este trabalho tem como objetivo o estudo da interferência entre canais de dados e voz (sinais de diferentes naturezas) dentro do mesmo cabo em sistemas de cabeamento estruturado. O meio físico (canal de transmissão) padrão para estes sistemas é o cabo de pares trançados sem blindagem (UTP – *Unshielded Twisted Pair*) de quatro pares, Categoria 5e, especificado para operar em uma banda de frequências de 100 MHz. O canal é modelado e sua resposta em frequência para a banda de interesse é estudada levando-se em consideração os efeitos da diafonia (que consiste do principal mecanismo de acoplamento de ruído entre canais dentro do mesmo cabo) nos sistemas em estudo, bem como eventuais fontes internas e/ou externas de ruído aditivo de importância relevante nos casos considerados.

A avaliação dos níveis de interferência é obtida teoricamente a partir do modelo do canal utilizado e validado por meio de medições de campo realizadas em instalações reais de sistemas de cabeamento estruturado. A interferência do canal de dados sobre o canal de voz é avaliada medindo-se a tensão psfométrica induzida neste e a interferência do canal de voz sobre o canal de dados é avaliada por meio da taxa de erro de *bits* (BER) medida.

Palavras-chave- cabeamento estruturado, interferência eletromagnética, ruído psfométrico, taxa de erro de bit.

I. INTRODUÇÃO

Este trabalho tem como objetivo a análise de interferência entre canais de dados e voz em cabos UTP (*Unshield Twisted Pair*) em sistemas de cabeamento estruturado, compartilhando diferentes pares do mesmo cabo para aplicações diversas. Para o desenvolvimento deste estudo, apresento os aspectos gerais acerca dos mecanismos de interferência entre cabos em sistemas de telecomunicações com o propósito de conhecermos as várias formas possíveis de interferência, suas causas e efeitos bem como seus métodos de controle.

Para uma utilização mais otimizada dos pares dos cabos UTP, alguns fabricantes de sistemas de cabeamento estruturado oferecem aos seus usuários dispositivos conhecidos como *splitters*, duplicadores ou adaptadores. Estes dispositivos têm como objetivo a utilização da capacidade total de cada segmento de cabo terminado em uma tomada RJ 45, disponível na área de trabalho. Para tanto, um duplicador permite a habilitação de dois serviços em um único ponto de acesso da área de trabalho. Estes serviços podem ser dois pontos de acesso à rede de dados, um ponto de dados e, um ponto de voz ou dois pontos de voz conforme a necessidade específica do usuário que ocupa a área em questão.

Da mesma forma, adaptadores com quatro saídas podem ser utilizados em um único ponto de acesso para a habilitação de até quatro serviços de telefonia. A aplicação mais comum na prática

destes dispositivos é a conexão de um microcomputador em rede e um ramal de PABX em um mesmo ponto de acesso da área de trabalho.

Estes dispositivos estão representados nas figuras 1 e 2 abaixo.

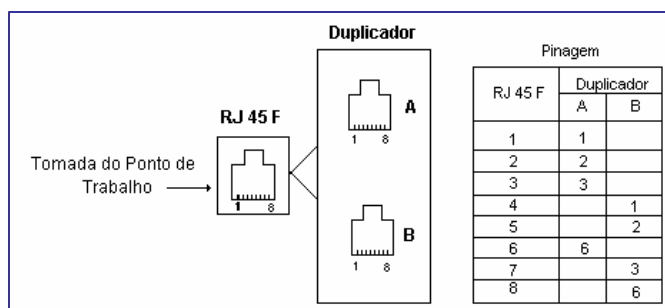


Figura 1 – Duplicador ou *splitter* utilizado em sistemas de cabeamento estruturado

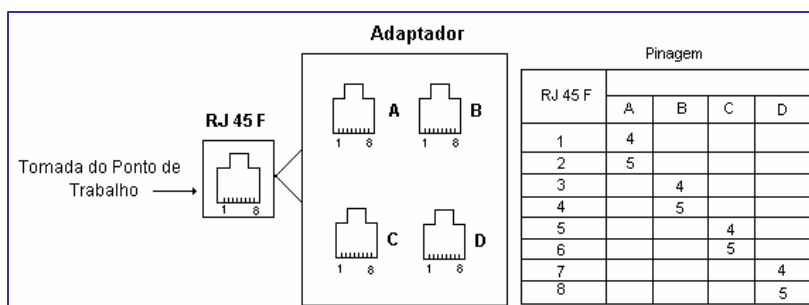


Figura 2 – Adaptador de quatro saídas utilizado em sistemas de cabeamento estruturado

Verificamos que o mecanismo de diafonia (*crosstalk*) é o principal responsável pelo acoplamento de ruído entre diferentes pares dentro do mesmo cabo UTP ou entre diferentes pares de cabos adjacentes em sistemas de cabeamento estruturado. A tensão de ruído presente no canal interferido, por meio dos mecanismos de diafonia, pode ter intensidade suficiente para ser percebida pelo usuário como ruído audível em uma comunicação de voz por meio de uma linha telefônica analógica ou para comprometer a integridade dos dados em uma transmissão digital em um canal de dados.

Assim, analiso, neste trabalho, o nível de ruído psfométrico induzido no canal de voz em função do canal de dados ativo para quantificar a interferência do canal de dados sobre o canal de voz. Da mesma forma, verifico a variação da taxa de erro de *bit* (*BER, Bit Error Rate*) do canal de dados em função do canal de voz ativo por meio da variação da relação atenuação paradiafonia (*ACR, Attenuation to Crosstalk Ratio*) do canal de dados de modo a quantificar esta interferência.

Com o objetivo de melhor compreender os efeitos do ruído sobre um sistema de comunicação digital, discuto, neste estudo, os problemas devidos ao canal na recuperação de dados cujos aspectos fundamentais são o tipo de sinal presente no canal e sua codificação, além do mecanismo de detecção de sinais binários utilizado pelo circuito do receptor. O foco de minha análise está nos sinais PCM (*Pulse Code Modulation*) codificação *Manchester* por se tratarem dos mais empregados em redes *Ethernet* a 10 e a 100 Mb/s em ambientes comerciais de redes locais.

O desempenho de sistemas PCM é normalmente avaliado pela probabilidade de erro de *bit* ou taxa de erro de *bit* (BER) que é o termo mais comumente utilizado no jargão técnico, conforme já citado anteriormente. Pode-se verificar também que há uma relação entre a taxa de erro de *bit* de um sistema de comunicação digital e sua relação sinal-ruído conforme apresentado na figura 3.

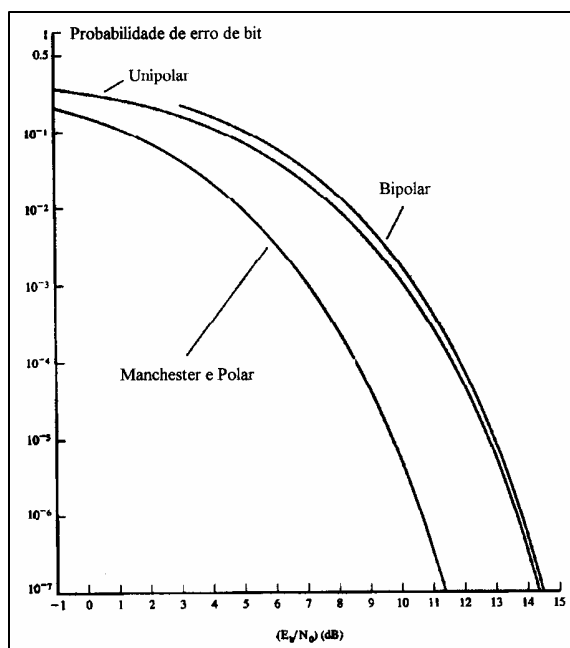


Figura 3 – Probabilidade de erro de bit em função da relação sinal ruído para diferentes códigos de linha no formato PCM

No entanto, a relação sinal-ruído não é um parâmetro cuja medição é especificada em normas técnicas, no que diz respeito aos testes que devem ser realizados no sistema de cabos para sua aceitação. O parâmetro que deve ser observado em sistemas de cabeamento estruturado que melhor representa sua relação sinal ruído é o ACR (*Attenuation to Crosstalk Ratio*) ou relação atenuação-paradifonia. Por este motivo, minha análise do comportamento do canal para taxa de erro de *bit* para códigos PCM *Manchester* foi realizada obtendo-se a relação entre taxa de erro de *bit* e ACR em sistemas de cabeamento estruturado.

Para a determinação destas relações, desenvolvi um modelo teórico com o auxílio do programa de simulação MATLAB, versão 5 e alguns arranjos de testes específicos foram utilizados para a medição dos valores de nível de ruído psfométrico induzido no canal de voz, assim como para a medição da variação do ACR no canal de dados nas condições de interesse neste estudo.

Por meio das medições efetuadas nestes arranjos foi possível a validação do modelo teórico proposto utilizado para a análise de interferência entre os canais de dados e voz em sistemas de cabeamento estruturado em edifícios comerciais. Apresento, inclusive, limites para uma operação segura dos canais de dados e voz em sistemas de cabeamento estruturado na presença de ruído.

II. INTERFERÊNCIA ENTRE CABOS EM SISTEMAS DE TELECOMUNICAÇÕES

O grau de interferência em cabos depende de alguns fatores, como: projeto; construção e características, de sua interação com outros elementos do sistema (conectores, equipamentos terminais, outros cabos, blindagem, etc.); além de certos parâmetros do sistema e propriedades do

ambiente. Como o objetivo deste trabalho é a análise de interferências entre canais de dados e voz dentro do mesmo cabo em sistemas de cabeamento estruturado, concentro a atenção nos cabos de pares trançados sem blindagem, UTP (*Unshielded Twisted Pair*), Categoria 5e, de quatro pares. Este é o meio físico padronizado para a implementação destes sistemas. Há uma variedade de fatores limitativos de desempenho de transmissão de sinais digitais associados aos cabos, que devem ser considerados no projeto e utilização destes, que são:

- atenuação;
- ruído, que pode ser, basicamente, de quatro tipos:
 - ruído diferencial (característico do circuito);
 - ruído longitudinal (por interferência devida a cabos de alimentação elétrica);
 - ruído impulso;
 - diafonia (*crosstalk*);
- distorções por atraso de propagação;
- *jitter* e *wander*.

Os fatores listados acima não são os únicos limitativos de desempenho de sistemas de transmissão digital. Estes são apenas os fatores que podem ser atribuídos diretamente ao canal. Há outros fatores que limitam o desempenho de sistemas de transmissão de dados que não são características do canal e sim da transmissão digital propriamente dita. Por exemplo, a regeneração do sinal transmitido, no circuito do receptor, pode acarretar uma probabilidade não desprezível de erro, mesmo sem levarmos em consideração os fatores limitativos do canal de transmissão.

Entre os fatores listados acima, a diafonia pode ser considerada como a principal causa de interferência eletromagnética entre cabos em sistemas de cabeamento estruturado. A diafonia ocorre devido aos mecanismos de acoplamento indutivo e capacitivo e é o maior fator limitativo de desempenho em sistemas de comunicação digital que utilizam o cabo de pares trançados como meio de transmissão.

A diafonia entre dois pares em um cabo UTP depende de vários fatores, entre eles, aspectos construtivos do cabo como diâmetro da seção transversal dos condutores, passo de torção, material empregado no isolante e simetria entre os pares.

O acoplamento por diafonia não pode ser eliminado, mas pode ser reduzido por:

- uso de terminações balanceadas;
- trançamento dos pares com diferentes passos de torção dentro do mesmo cabo;
- fabricação do cabo, mantendo-se o desequilíbrio capacitivo entre pares em valores mínimos;
- uso de cabos blindados;
- práticas de instalação baseadas em normas específicas.

Uma preocupação especial é dispensada aos efeitos da diafonia e ao seu controle em sistemas de cabeamento estruturado. A diafonia pode apresentar-se sob duas formas distintas: a paradiafonia (*NEXT-Near End Crosstalk*) e, a telediafonia (*FEXT-Far End Crosstalk*). A diafonia medida no canal interferido, na mesma extremidade do circuito interferente onde se encontra a fonte de ruído, denomina-se paradiafonia ou NEXT. Da mesma forma, a diafonia medida no canal interferido, na extremidade oposta àquela onde se encontra a fonte de ruído no canal interferente, denomina-se telediafonia ou FEXT.

Por definição, a diafonia é a relação entre a potência P_2 do sinal induzido no circuito interferido e a potência P_1 do sinal interferente. Quando expresso em dB, o acoplamento por diafonia é

$$D = 10 \log \frac{P_2}{P_1} \text{ (dB)} \quad (1)$$

Quando as impedâncias características de ambos os circuitos (interferente e interferido) são iguais, a relação entre potências pode ser substituída pela relação entre correntes ou tensões, e a diafonia, em dB, torna-se

$$D = 20 \log \frac{V_2}{V_1} = 20 \log \frac{I_2}{I_1} \text{ (dB)} \quad (2)$$

Uma aproximação interessante para o cálculo das relações entre correntes e tensões de diafonia foi desenvolvida por Campbell. A Fórmula de Campbell, como é conhecida, foi inicialmente desenvolvida para elementos eletricamente curtos de pares de condutores paralelos de comprimentos iguais terminados com cargas cujos valores de suas impedâncias características são os mesmos. Esta fórmula, inicialmente desenvolvida para ser aplicada a condutores abertos, foi também adaptada para estudos de cabos. Na figura 4, encontra-se representado o arranjo elétrico para dedução da Fórmula de Campbell.

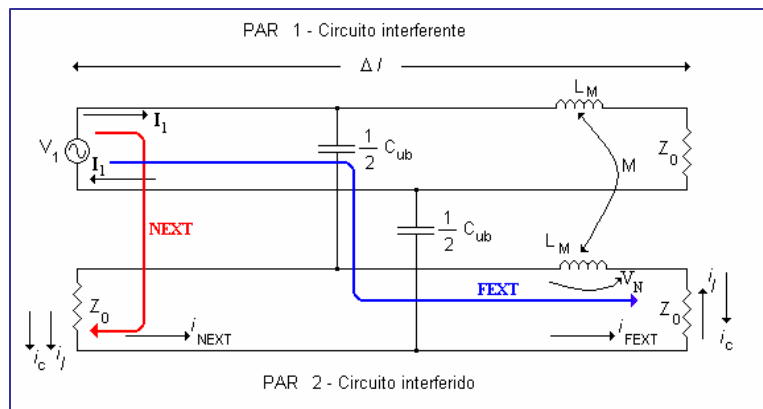


Figura 4 – Mecanismos de acoplamento por diafonia em cabos UTP

A fonte de tensão V_1 produz uma corrente $2i_c$ por meio do desequilíbrio capacitivo C_{ub} (par-par) e uma corrente i_c flui para ambas as extremidades do circuito 2. A corrente I_1 induz uma tensão no circuito 2 devido à indutância mútua L_M e uma corrente de *loop* i_l flui no circuito 2 (note o sentido da corrente i_l em ambas as extremidades deste). A tensão de ruído, V_N , induzida no circuito interferido devida à corrente I_1 no circuito interferente pode ser definida como

$$V_N = j\omega L_M I_1 \quad (3)$$

A partir da expressão 3 e com alguma álgebra, a fórmula de Campbell pode ser escrita, então, para estabelecer a diafonia para comprimentos longos de cabos, como

$$\text{NEXT} = 20 \log \left(\frac{j\omega C_{ub} Z_0}{8} + \frac{j\omega L_M}{2Z_0} \right) \cdot \frac{1}{\sqrt{n}} \cdot \sqrt{1 - \frac{e^{-4\alpha l}}{4\alpha N}} \quad (\text{dB}) \quad (4)$$

onde,

n é o comprimento infinitesimal de uma seção do cabo (seção T do modelo adotado neste estudo), em metros;

α é a constante de atenuação do cabo, em dB/m;

l é o comprimento total do cabo, em metros;

N é o número de seções infinitesimais do cabo (seções T) que devem ser cascadeadas para modelar um cabo de comprimento l [6].

Devido a este comportamento, não é possível obter-se o mesmo nível de desempenho para paradiáfonia e telediafonia em sistemas de cabeamento estruturado. A melhor estratégia para aproximar os níveis de desempenho do sistema para ambos os tipos de diafonia é por meio da obtenção das melhores possíveis características de acoplamento indutivo na etapa de fabricação dos cabos UTP, bem como do *hardware* de conexão, uma vez que o acoplamento capacitivo é mais bem comportado e atende facilmente às especificações dos padrões aplicáveis.

Outro fator responsável pelos diferentes níveis de desempenho para a paradiáfonia e telediafonia em sistemas de cabeamento estruturado é a natureza da telediafonia, ou seja, a adição de diafonia ao longo do comprimento do segmento de cabo considerado. Para a paradiáfonia, a dependência do comprimento é desprezível. A medição da paradiáfonia é necessária para a aceitação de sistemas de cabeamento estruturado. Ambas as normas, Americana (ANSI/TIA/EIA-568-B) e Internacional (ISO/IEC 11801:2000), determinam que este parâmetro seja medido e estabelecem metodologias de testes e limites para sua aceitação.

III. METODOLOGIA DE TESTES E RESULTADOS

Para a medição dos níveis de interferência do canal de dados sobre o canal de voz foi utilizado o seguinte arranjo de teste (figura 5).

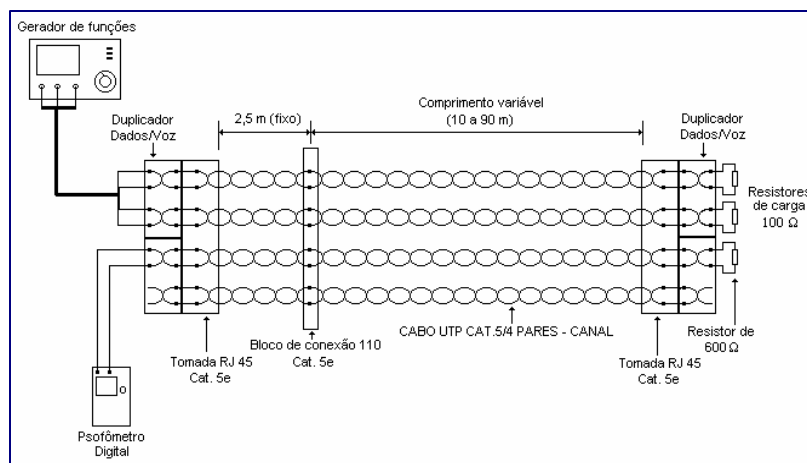


Figura 5 – Arranjo de teste para a medição da interferência do canal de dados sobre o canal de voz

O canal foi implementado de modo a permitir a variação de seu comprimento de 10 a 100 m em intervalos de 10 m. Para facilitar esta operação, utilizei um bloco de conexão tipo 110 em uma das extremidades do canal. Com o uso deste dispositivo, cada vez que necessitava variar o comprimento

do canal, bastava desconectar o segmento de cabo do bloco, retirar 10 m de seu comprimento, reconectá-lo ao bloco e rodar os testes para o novo comprimento do canal (esta operação podia ser repetida quantas vezes fossem necessárias). Desta forma, as tomadas RJ 45, montadas em cada extremidade do canal não precisavam ser manipuladas nem tampouco os duplicadores DADOS/VOZ instalados precisavam ser desconectados destas. Com esta técnica, além de um ganho significativo de tempo durante a execução dos testes, simulei uma condição de canal real em um sistema de cabeamento estruturado.

Ainda levando-se em consideração as recomendações e observando os requisitos de normas técnicas aplicáveis, mantive o comprimento máximo do canal dentro do limite de 100 metros (incluindo os cordões dos equipamentos de testes utilizados nas medições). A figura 6 apresenta a curva de resposta para a tensão de ruído induzida no canal de voz com o canal de dados ativo para um comprimento de 100 m.

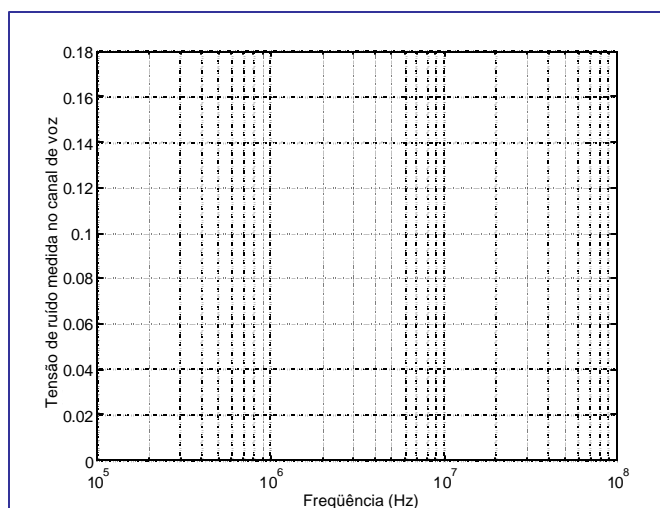


Figura 6 – Curva de resposta de tensão de ruído induzida no circuito de voz com o circuito de dados ativo para um comprimento de 100 m de canal.

A Tabela 1 apresenta os níveis de ruído psfométrico induzidos no canal de voz com o canal de dados ativo para diferentes comprimentos de canal.

Comprimento do canal (m)	Nível de ruído psfométrico Induzido (dBm) / (mV rms)
10	- 100,1 / 7,63
20	- 97,5 / 10,33
30	- 95,9 / 12,40
40	- 94,8 / 14,14
50	- 93,8 / 15,67
60	- 93,1 / 17,06
70	- 92,5 / 18,34
80	- 92,0 / 19,53
90	- 91,5 / 20,65
100	- 91,0 / 21,71

Nota: Nível psfométrico do canal em repouso: - 15,4 dBm
Tabela 1 – Nível de ruído psfométrico medido no canal de voz

Para a medição da interferência sobre o canal de dados com o canal de voz ativo foi utilizado o seguinte arranjo de teste (figura 7).

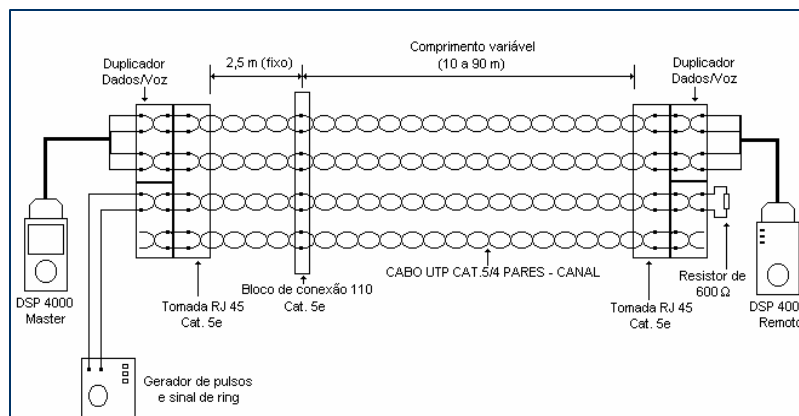


Figura 7 – Arranjo de teste para a medição da interferência do canal de voz sobre o canal de dados

No arranjo de testes esquematizado na figura 7, o gerador de pulsos e de sinal de *ring* foi utilizado para simular atividade no canal de voz (discagem decádica e *ring*) enquanto os equipamentos de certificação de cabeamento (DSP-4000, da Fluke) faziam a medição dos parâmetros especificados pela ANSI/TIA/EIA-568-B, incluindo o ACR, parâmetro utilizado como referência para a análise da interferência do canal de voz sobre o de dados neste estudo.

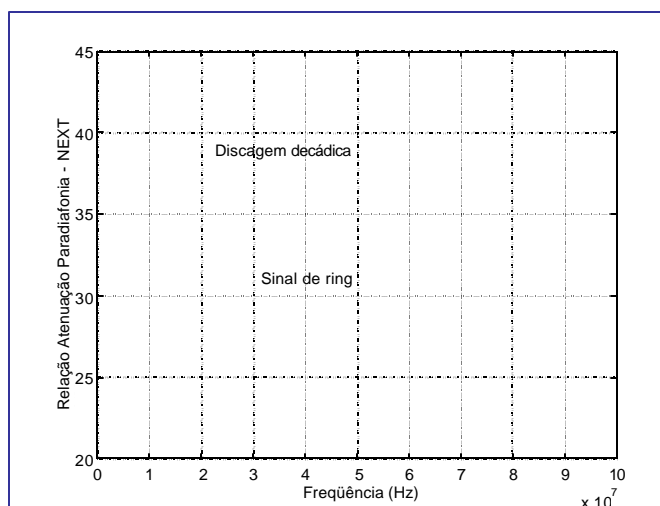
A Tabela 2, apresenta os resultados dos testes do canal de dados para as condições importantes do canal de voz adjacente (DD: discagem decádica e SR: sinal de *ring*).

Comprimento do canal (m)	DD ACR (dB)	Taxa de erro de <i>bit</i>	SR ACR (dB)	Taxa de erro de <i>bit</i>	Freq. (MHz)
20	46,5	$2 \cdot 10^{-42}$	41,4	$7 \cdot 10^{-38}$	96,75
40	41,3	$8 \cdot 10^{-38}$	41,3	$8 \cdot 10^{-38}$	91,75
60	38,1	$5 \cdot 10^{-35}$	38,0	$6 \cdot 10^{-35}$	99,25
80	28,1	$3 \cdot 10^{-26}$	28,1	$3 \cdot 10^{-26}$	96,75
100	26,8	$2 \cdot 10^{-25}$	23,9	$1 \cdot 10^{-22}$	92,75

Tabela 2 – Valores de ACR medidos em função do canal de voz ativo e taxa de erro de *bit* calculada para cada valor de ACR

A primeira coluna da tabela acima apresenta o comprimento do canal sob teste. Nas colunas seguintes, encontram-se os valores de ACR medidos no canal de dados para as condições de discagem decádica (DD) e sinal de *ring* (SR), respectivamente, bem como suas taxas de erro de *bit* associadas (calculadas). A última coluna da Tabela 2 apresenta a frequência na qual cada valor apresentado foi registrado por meio de medição.

A figura 8 apresenta a resposta de ACR de um canal de 100 metros de comprimento para as condições de discagem decádica e sinal de *ring* presentes no canal de voz.



Nota: comprimento do canal: 100 m

Figura 8 – Respostas de ACR do modelo para sinal de *ring* e discagem decádica

IV. CONCLUSÕES

Os arranjos práticos utilizados para a obtenção dos valores medidos dos parâmetros de interesse neste estudo, apesar de simples, mostraram-se extremamente eficientes. A escolha destes arranjos de testes teve como objetivo a reprodução das condições reais de uso de um sistema de cabeamento estruturado, compartilhando diferentes pares do mesmo cabo UTP para aplicações de dados e voz comerciais, comumente encontradas na prática.

O nível do ruído psfométrico induzido no canal de voz com o canal de dados ativo foi extremamente baixo para as diferentes configurações do canal (entre 10 e 100 m) e ficaram entre -100,1 dBm e -91,0 dBm. Com base nestes valores, foi possível concluir que não há uma interferência importante do canal de dados sobre o de voz para as condições de testes consideradas.

Para a medição do ACR, pode-se considerar que o equipamento utilizado (DSP-4000, da Fluke) no arranjo de teste específico, para a obtenção destes valores sob as várias condições de interesse neste estudo, mostrou-se extremamente eficiente sendo capaz de registrar as variações de ACR no canal de dados para diferentes condições adjacentes de acordo com o previsto no modelo proposto neste trabalho. Daí, concluiu-se, também, que com os valores de ACR registrados, as taxas de erro de bit associadas ficaram muito abaixo dos limiares considerados críticos por diferentes organismos normativos pertinentes. Portanto, para as condições de testes aqui descritas e utilizadas, pode-se considerar que a interferência do canal de voz sobre o canal de dados é desprezível. Assim, a utilização de *splitters* ou duplicadores para o compartilhamento de pares de um mesmo cabo UTP para aplicações de dados e voz é perfeitamente aceitável e seguro para aplicações *Ethernet* a 10 e 100 Mb/s.

V. REFERÊNCIAS

- [1] Tsaliovich, Anatoly
Cable shielding for electromagnetic compatibility
Van Nostrand Reinhold, First Edition – 1995
- [2] Werner, J.
Impulse noise in the loop plant
Proceeding of the IEEE international conference on communications - 1990 (ICC'90).

- [3] Szechenyi, K., Bohm, K.
Impulse noise limited transmission performance of ISDN subscriber loops.
IEEE – Proceedings of the international symposium on subscriber loops and services – 1988 (ISSLS' 88), Paper 2.3
- [4] Vanelli, J. and Shenadeh, N. M.
Computation of Bit – error probability using the trapezoidal integration rule
IEEE – Transactions on communications - March, 1974 – pages 331 to 334.
- [5] Sistanizadeh, K. and Kerpez, k.
A comparison of passband and baseband transmission schemes for HDSL.
IEEE – Journal on selected areas in communications, Vol. 9, Number 6 August, 1991.
- [6] Waggener, Bill
Pulse Code Modulation techniques with applications in communications and data recording – First Edition.
Van Nostrand Reinhold – A division of Thompson Publishing Inc., New York – 1995.
- [7] Reeve, Whitham D.
Subscriber loop signalig and transmission handbook – Digital
IEEE Press, IEEE telecommunications handbook series
New York, 1995 – Second Edition
- [8] Van Trees, H.L.
Detection, estimation and modulation theory, Part 1
John Wiley & Sons, Inc.
New York, 1968
- [9] Marin, Paulo S.
Propagação de sinais digitais a altas velocidades em cabos de pares trançados sem blindagem (UTP)
Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Mackenzie em Outubro/1997
- [10] Grover, Frederick W. (PhD)
Inductance Calculations, Working Formulas and Tables
Dover Publications, New York 1946
- [11] Klewe, H.R.J.
Interference between power systems and telecommunication lines
Edward Arnold Publishers, Ltd.
London (First edition) 1958
- [12] Marin, Paulo S.
Interferência entre sinais de dados e voz dentro do mesmo cabo em sistemas de cabeamento estruturado.
Tese de Doutorado apresentada à Universidade Presbiteriana Mackenzie em Dezembro/2000
- [13] Carlson, Gordon E.
Signal and linear system analysis – with MATLAB
John Wiley & Sons, Inc.
Second edition, 1998