



## Desenvolvimento de um Analisador para Cabos do Tipo Par Trançado (UTP) de baixo custo

Guilherme Elidio Ferri<sup>1</sup>, João Onofre Pereira Pinto<sup>2</sup>

<sup>1</sup>UFMS/DEL/BATLAB, Campo Grande, MS, Brasil, elidioferri@gmail.com

<sup>2</sup>UFMS/DEL/BATLAB, Campo Grande, MS, Brasil, joaonofre@gmail.com

**Abstract:** This paper describes the development of a low cost Analyzer for network cables of type twisted pair (UTP – Unshielded Twisted Pair) that carry out the ten tests required by ANSIA/TIA/EIA-568B rules. The physical project is divided in to four blocks, which are, control, sample, transmission and TDR. The sample, transmission and TDR blocks were simulated with the aid of Proteus software from Labcenter Electronics. The control block, responsible for carrying out the tests, was programmed in C language and it used the MPLAB software from Microchip for its validation. The results obtained in the simulations were satisfactory, showing the effectiveness of the equipment proposed.

**Keywords:** first keyword, second keyword, third keyword, fourth keyword (maximum of five).

### 1. INTRODUÇÃO

O cabo UTP é um meio guiado de cobre que foi desenvolvido para substituir os tradicionais cabos coaxiais. Os fios que constituem os cabos UTP são trançados por toda a extensão e envolvidos com uma capa protetora. As principais características desse cabo é o suporte a altas frequências, resistência física, redução da interferência eletromagnética, fácil instalação e baixo custo.

O padrão ANSIA/TIA/EIA-568B especifica dez testes que o cabo de cobre deve passar antes que possa ser usado em redes locais Ethernet de alta velocidade, a sessão 3 descreve com mais detalhes os dez testes. Todos os cabos deverão ser testados até a capacidade máxima que é aplicada a categoria do cabo em teste.

Os equipamentos de teste para cabos de transmissão de dados são usados na prevenção e diagnóstico de falhas que normalmente estão relacionados com a camada física. O que se verifica é que nem sempre os instrumentos de teste são usados, devido principalmente ao seu custo elevado, como mostra a pesquisa de mercado, feitas nos sites *Eurekaspot* e *CableOrganize*, onde os equipamentos de certificação *DSP-4000* e *DTX-1800* da *Fluke*, estão cotados respectivamente entorno de R\$ 14.290,00 e R\$ 34.142,00.

Este artigo mostra o desenvolvimento de um equipamento que realize todos os testes exigidos, para certificação de cabos UTP categorias 4, 5, 5e e 6, buscando reduzir seu custo de produção.

### 2. CABO DE PAR TRANÇADO SEM BLINDAGEM (UTP)

Os cabos de Par Trançado sem blindagem (UTP) são compostos de quatro pares de fios de cobre de 22 ou 24 AWG isolados em polietileno especial, envoltos com uma capa de PVC. Esse tipo de cabo usa apenas o efeito de cancelamento, produzido pelos pares de fios trançados para limitar a distorção do sinal causada por EMI (Interferência eletromagnética), RFI (interferência de radio frequência) e a diafonia [1]. Esses cabos são classificados em categorias conforme sua capacidade de transmissão.

### 3. PRINCIPAIS TÓPICOS ABORDADOS NA CERTIFICAÇÃO

Segundo a norma ANSIA/TIA/EIA-568B, dez testes devem ser realizados em um cabo do tipo par trançado antes que possa ser usado. O cabo é considerado certificado se nenhum dos dez testes resultarem em valores discrepantes dos exigidos pela norma. Os dez testes são os seguintes:

- Mapa de fios
- Perda por inserção
- Diafonia próxima (*NEXT – Near-end crosstalk*)
- Diafonia próxima por soma de potências (*PSNEXT – Power sum near-end crosstalk*)
- Diafonia distante de mesmo nível (*ELFEXT – Equal-level far-end crosstalk*)
- Diafonia distante por soma de potência de mesmo nível (*PSELFEXT – Power sum equal-level far-end crosstalk*)
- Perda de retorno
- Atraso de propagação
- Comprimento do cabo
- Desvio de atraso.

#### 3.1. Mapa de Fios

O padrão Ethernet especifica que cada um dos pinos em um conector RJ-45 tenha um determinado propósito. Uma placa de rede transmite sinais nos pinos 1 e 2, e recebe nos pinos 3 e 6 para as tecnologias *Ethernet* e *fast Ethernet*. A *gigabit Ethernet* usa todos os quatro pares de fios durante a transmissão [6].

Os fios do cabo UTP precisam estar conectados aos pinos corretos de cada extremidade de um cabo. O teste de mapa de fios garante que não existe nenhum circuito aberto ou curto no cabo ou uma conexão errada.

### 3.2. Perda por Inserção

A diferença de impedância ou descontinuidade de impedância entre conector e cabo provoca a reflexão de parte do sinal, reduzindo mais ainda a amplitude e contribuindo para a atenuação. A combinação dos efeitos da atenuação do sinal e as descontinuidades de impedância em uma linha de comunicações são chamadas de perda por inserção.

### 3.3. Diafonia Próxima (NEXT)

Quando uma corrente flui através de um condutor, um campo eletromagnético é criado em torno deste, e este pode gerar interferência nos condutores adjacentes. Esse efeito é chamado de diafonia e é proporcional ao aumento da frequência [9].

A NEXT trata-se da interferência provocada por um par de fios próximo ao outro quando sua magnitude é medida na mesma extremidade do transmissor. Todos os pares são testados e calcula-se a NEXT através da relação entre a tensão emitida ( $V_e$ ) e a recebida ( $V_r$ ), normalmente o resultado é expresso em decibéis, como mostra a Equação 1.

$$NEXT = 20 * \log\left(\frac{V_r}{V_e}\right) \quad (1)$$

### 3.4. Diafonia Próxima por Soma de Potência (PSNEXT)

A NEXT por Soma de Potências (PSNEXT) mede o efeito acumulado da NEXT de todos os pares de fios no cabo. A PSNEXT é computada para cada par de fios baseada nos efeitos da NEXT dos outros três pares [6].

### 3.5. Diafonia Distante de Mesmo Nível (ELFEXT)

A FEXT (*Far-End Crosstalk*) é medida na extremidade distante do cabo e não leva em consideração a atenuação sofrida pelo sinal ao se propagar pelo par, a ELFEXT é a FEXT com a atenuação, esse valor qualifica melhor o efeito provocado pelo par adjacente. A ELFEXT é expressa em decibéis, seu valor é calculado da mesma forma da NEXT, mostrada na Equação 1.

### 3.6. Diafonia Distante por Soma de Potência de Mesmo Nível (PSELFEXT)

A ELFEXT por Soma de Potências (PSELFEXT) mede o efeito acumulado da ELFEXT de todos os pares de fios no cabo em um único par. A PSELFEXT assim como a PSFEXT não é uma medida, mas uma soma algébrica dos resultados medidos para ELFEXT e NEXT.

### 3.7. Perda de Retorno

A perda de retorno é medida em decibéis, e mostra as reflexões que são causadas pelas descontinuidades de impedância ao longo do cabo.

### 3.8. Atraso de Propagação

O atraso de propagação é o tempo gasto por um sinal para percorrer toda a extensão de um cabo. O atraso em um par de fios depende do seu comprimento, número de tranças e propriedades elétricas.

### 3.9. Comprimento do Cabo

Os testadores medem o comprimento do fio baseando-se no tempo gasto por um pulso elétrico em percorrer toda a extensão do cabo, um TDR (Reflexão no Domínio do Tempo) é geralmente usado para este fim. A Equação 2 mostra o cálculo do comprimento de um cabo com base no tempo de propagação de um pulso elétrico ( $tp$ ).

$$z = (VNP \times c) \times tp \quad (2)$$

- $z$  é o comprimento do cabo.
- $VNP$  é a velocidade nominal de propagação do cabo, que para cabos UTP é de 68%.
- $c$  é a velocidade da luz no vácuo.
- $tp$  é o tempo de propagação de um pulso ao longo do cabo.

Os fios internos do cabo UTP são trançados e seu comprimento calculado é maior que o medido externamente, para tanto se usa a taxa de torções (TT) para calcular o tamanho real do cabo.

### 3.10. Desvio de Atraso

O atraso de propagação pode ser diferente entre os pares em um único cabo devido às diferenças no número de tranças e propriedades elétricas de cada par de fios. A diferença de atraso entre pares é conhecida como desvio de atraso. O desvio de atraso é um parâmetro crítico para redes de alta velocidade nas quais os dados são simultaneamente transmitidos. Se o desvio de atraso entre os pares for muito grande, os *bits* chegam em diferentes tempos e os dados não podem ser reagrupados adequadamente.

## 4. DEFINIÇÃO DA ESTRUTURA FÍSICA DO ANALISADOR

A redução do custo se fundamenta na construção de um equipamento com a base de processamento em baixa velocidade, e as estruturas referentes aos testes de alta velocidade com componentes que a suportem. A filosofia se resume em dividir o processo em grupos com velocidades diferentes, possibilitando a definição individual de cada grupo.

O analisador proposto operará no modo mestre/escravo, sendo o mestre responsável pela configuração, gerenciamento e análise dos testes. O escravo realiza os testes de ELFEXT, PSELFEXT e perda por inserção e transmite os resultados ao mestre. Outra função é dar suporte ao mestre para realização dos outros sete testes.

## 5. DIAGRAMA DE BLOCOS DO MESTRE

A Fig. 1 mostra o diagrama de blocos do mestre, sendo que o mesmo está dividido em quatro blocos, sendo estes, transmissor, amostragem, controle e TDR.

Os dois equipamentos, mestre e escravo, devem ter a mesma referência de terra, no entanto, eles são interligados unicamente pelo cabo em teste, como todos os fios que compõe o cabo precisam ser testados, não é possível dedicar um fio como terra. Para contornar este problema é implementado um controle de terra, que permite ao sistema definir dinamicamente qual fio será usado como referência entre os dois equipamentos.

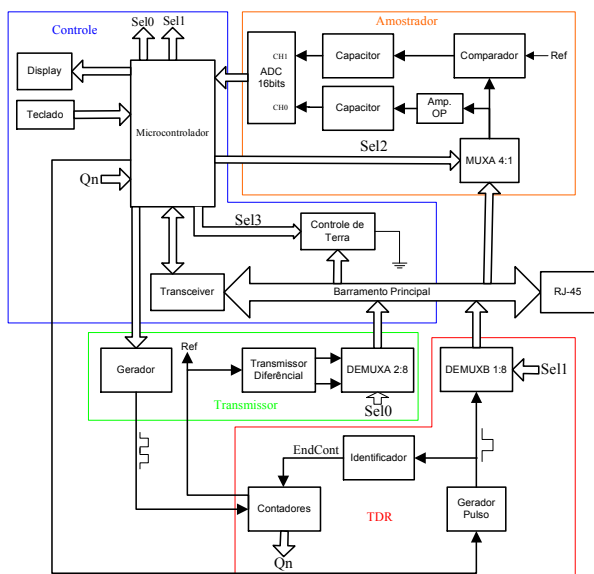


Fig. 1. Diagrama de blocos do mestre.

### 5.1. Bloco de Controle

O bloco de controle é responsável por gerenciar e executar os testes e exibir os resultados ao usuário. O microcontrolador PIC18F6520 da *microchip* é usado para executar o *software* escrito na linguagem C.

### 5.2. Bloco Transmissor

O sinal proveniente do gerador entra nos contadores que também desempenha a função de divisor. Em seguida o transmissor diferencial modula este sinal para dois sinais com amplitudes inversas para então serem transmitidos pelo cabo, como mostra a Fig. 2.

Para não serem necessários dois geradores, um para os contadores e outro para transmissão, um único gerador ajustável é usado, sendo este o NBC12430 que pode ser ajustado para frequências entre 50 e 800 MHz. Como algumas das frequências exigidas nos testes estão abaixo de 50 MHz, os contadores são usados como divisores de frequência.

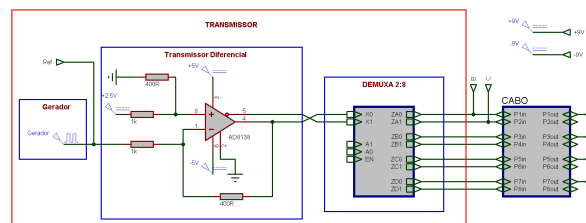


Fig. 2. Detalhamento do transmissor.

### 5.3. Bloco de Amostragem

O bloco de amostragem é responsável por adquirir os dados para que estes sejam processados pelo microcontrolador. A primeira fase consiste em selecionar o par de fios que será amostrado. Para tanto um multiplexador é usado (MUXA). Em seguida este sinal é multiplicado por uma constante, sendo que sua parte negativa é retificada e um capacitor é usado para identificar o seu valor de pico. Isto faz com que a tensão de entrada do A/D de 16 bits seja constante. A Fig. 3 mostra o circuito do bloco de amostragem.

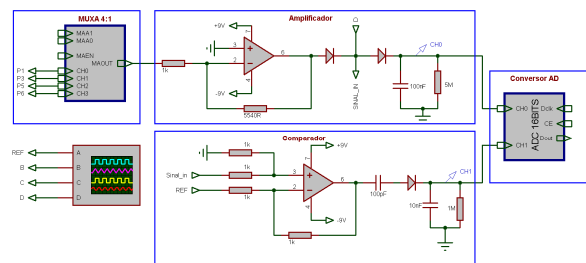


Fig. 3. Detalhamento do bloco de amostragem.

O comparador usa o sinal recebido para realizar o teste de perda por inserção. Este teste deve ser realizado para todas as frequências pré-determinadas pela norma. O resultado do comparador é a subtração entre o sinal recebido e a referência que é proveniente do gerador ajustável. Como mostrado na Fig. 3.

### 5.4. Bloco TDR

O termo TDR do inglês *Time Domain Reflectometry* é uma importante técnica baseada nas teorias de reflexão óptica e usada para identificar e diagnosticar cabos de transmissão, principalmente sistemas digitais de alta velocidade [4].

Sua função é detectar falhas no cabo e realizar os testes de atraso de propagação, desvio de atraso e comprimento do cabo.

Segundo a norma 568B, o comprimento mínimo especificado para um cabo UTP é de um metro. De acordo com [5], a velocidade nominal de propagação é de 68%. Desta forma, pode-se calcular o tempo que um sinal gasta para percorrer um metro de cabo, esse tempo é de aproximadamente 4,9 nanossegundos. Portanto, o gerador de pulso deve ser capaz de emitir um sinal com comprimento de onda menor que 4,9 nanossegundos.

A solução foi usar um *flip-flop* do tipo D com sua saída invertida ligada ao seu próprio pino de reset, como mostra a Fig. 4, fazendo com que na transição positiva do clock ele gere um pulso com tempo igual ao tempo de propagação típico do componente. Sendo assim, o comprimento mínimo do sinal é estipulado em função do componente, que para

este caso é o NL17SZ74 com tempo de propagação típico de 2,6 nanossegundos.

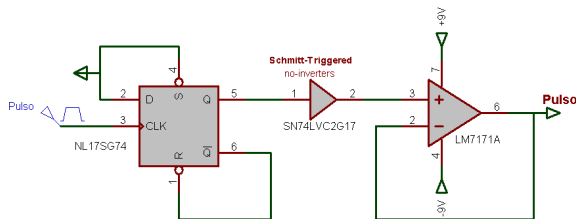


Fig. 4. Hardware do gerador de pulso.

O sinal gerado é inserido no cabo através de uma chave seletora de uma entrada e oito saídas. O pulso percorre toda extensão do cabo até encontrar um desacoplamento de impedância, acarretando sua reflexão parcial ou total, o problema é que o sinal refletido volta ao gerador com intensidade menor, isto impossibilita a captura deste sinal em uma porta lógica digital. O sinal poderia ser capturado por um conversor analógico/digital, no entanto o pulso é de curta duração e seria necessário um conversor de alta velocidade. Para resolver tal problema foi desenvolvido um identificador, capaz de recuperar um sinal atenuado e gerar sinais constantes que indiquem o estado do pulso. A Fig. 5 mostra o detalhamento do identificador.

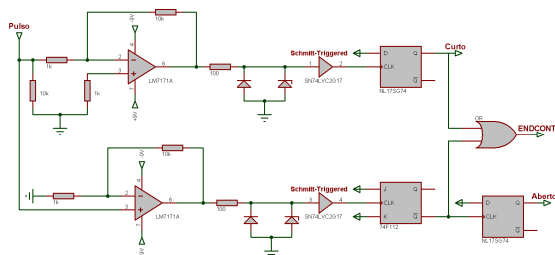


Fig. 5. Circuito do identificador.

O identificador tem como saída sinais, que indicam quando um pulso positivo ou negativo foi recebido. Além desta função o identificador é responsável por iniciar e bloquear os contadores.

Os contadores são responsáveis por medir o tempo decorrido da emissão do pulso a sua recepção. Eles fazem uso do sinal proveniente do gerador ajustável de alta frequência.

Sendo a frequência máxima fornecida de 800 MHz, o sistema de medição teria uma precisão de 25,5 cm. Para melhorar sua resolução sem aumentar o custo, os contadores foram posicionados em paralelo. A Fig. 6 mostra o diagrama de tempo onde dois contadores C1 e C2 são incrementados nas transições positivas e negativas do relógio, fazendo que o intervalo de transição de estado dos contadores seja dividido por dois.

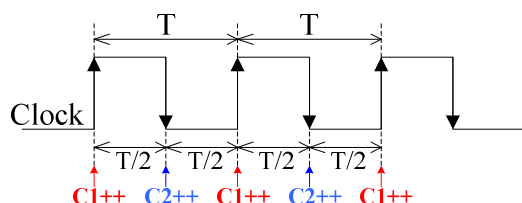


Fig. 6. Diagrama de tempo dos contadores em paralelo.

A aplicação desta técnica melhorou a precisão para 12,75 cm sem a necessidade de um novo gerador.

## 6. DIAGRAMA DE BLOCOS DO ESCRAVO

O escravo é composto por dois blocos, sendo estes, controle e amostragem. O bloco de amostragem tem a mesma função do mestre, a diferença é que para este caso não é implementado o comparador, que é usado unicamente para medir a perda de retorno.

O bloco de controle usa o microcontrolador da *microchip* PIC18F4420. Neste bloco também está implementado um controle de terra e um controle de acoplamento. A Fig. 7 exibe o diagrama de blocos do escravo.

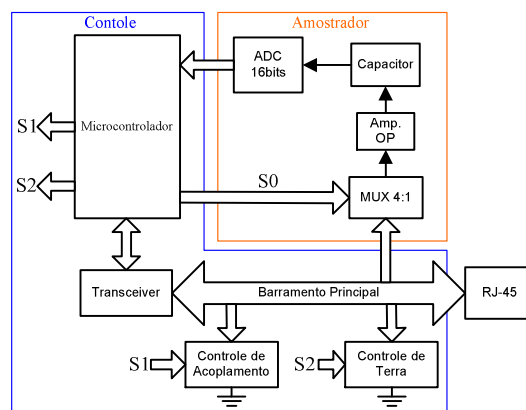


Fig. 7. Diagrama de blocos do escravo.

Com base na teoria de linha de transmissão [2], [3] e TDR [4], para não haver reflexões as impedância entre cabo e carga devem estar devidamente acopladas. Sendo assim, durante os testes de atenuação e *crosstalk*, uma carga de mesma impedância do cabo deve estar conectada ao par em teste. Porém os testes que usam o TDR necessitam que a carga esteja desacoplada, do contrário não haverá reflexões. Por este motivo está implementado um controle de acoplamento, que permite ao sistema inserir uma carga ou retirá-la conforme a necessidade dos testes.

## 7. DEFINIÇÃO DO SOFTWARE DO ANALISADOR

O software executado pelo microcontrolador tem a função de gerenciar todos os processos referentes aos testes, realizar as amostragens, calcular os resultados e mostrá-los ao usuário. A Fig. 8 mostra o fluxograma completo do processo de teste.

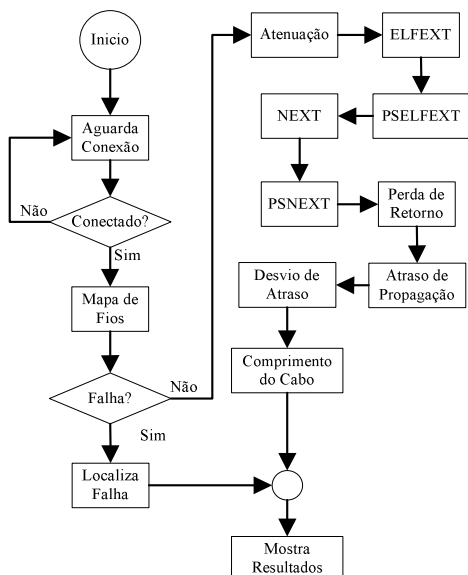


Fig. 8. Diagrama de blocos do software.

### 7.1. Mestre

O software do Mestre inicialmente aguarda sinais provenientes do escravo, ao receber esses sinais ele os usa para identificar o pino conectado na outra extremidade do cabo, se dois sinais forem recebidos ao mesmo tempo o software interpreta como sendo um curto-circuito. Caso um dos pinos não for identificado, este é caracterizado como uma ruptura. Para ambos os casos o TDR é acionado, e mede-se a distância até o problema. De posse do mapa de fios o software pode decidir em continuar os testes ou não.

O software do mestre executa instruções provenientes do escravo, para isto é implementado em ambos um protocolo de transmissão e recepção, que se encarrega de transmitir e receber instruções e dados.

Ao término de todos os testes o mestre exibe os resultados ao usuário que pode interagir através de um teclado.

### 7.2. Escravo

Inicialmente o software do escravo gera uma sequência de pulsos específica para cada pino do cabo, como mostra a Fig. 9.

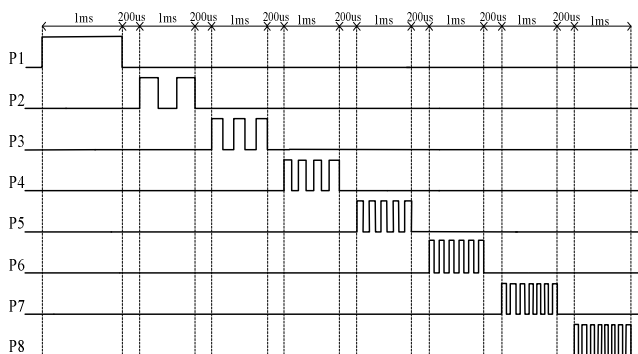


Fig. 9. Sequência inicial de pulsos.

Cada pino recebe um número de pulso igual a seu valor físico no conector, por exemplo, o pino 3 recebe uma sequência de três pulsos em um intervalo de 1 ms. O mestre recebe esses pulsos em um pino conhecido, com isto ele é

capaz de identificar os pinos conectados em ambas as extremidades do cabo e gerar o mapa de fios.

### 7.3. Protocolo de Transmissão e Recepção

O protocolo de transmissão e recepção define todos os procedimentos necessários para a comunicação entre mestre e escravo. Este protocolo é particular e foi desenvolvido visando à redução de dados transmitidos. Fazendo com que os testes sejam executados em menor tempo.

Foram definidos três tipos de pacotes de comunicação:

- Pacote do tipo Controle;
- Pacote do tipo Dados;
- Pacote de Aviso.

O pacote de controle é usado para transmitir instruções. O pacote de transmissão de dados é usado pelo escravo para enviar os resultados dos três testes que ele realiza.

O pacote ack é responsável por manter a consistência na transmissão. Ao receber um pacote de dados ou controle, o destino envia um pacote de ack informando o recebimento correto ou com falha do ultimo pacote transmitido. A origem continua a transmissão se somente receber um ack confirmando a entrega do pacote, se a origem não receber a confirmação em um intervalo de tempo, ela retransmite o pacote e aguarda novamente um pacote de ack, após três tentativas a origem para de transmitir, e para o processo de testes.

## 8. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O bloco de transmissão e amostragem foram simulados juntos e a Fig. 9 mostra o resultado obtido.

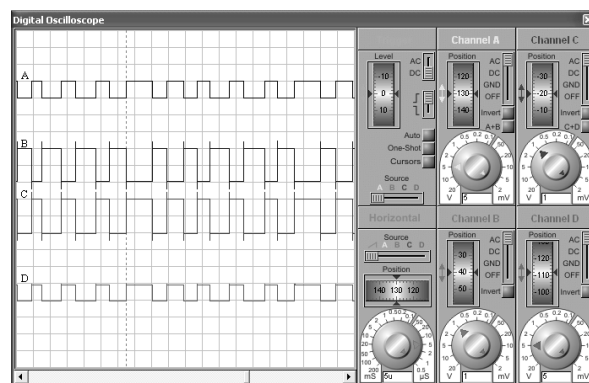


Fig. 10. (A) referência, (B e C) sinais diferenciais e (D) sinal amostrado.

O sinal da Fig. 10(A) representa a referência que é proveniente do gerador, que é usada para gerar os dois sinais diferenciais presentes no cabo Fig. 10(B e C), esses sinais são capturados pelo bloco de amostragem onde são multiplicados por uma constante e retificados, acaso os sinais presentes no cabo atenuem o mesmo ocorre com o sinal da Fig. 10(D).

O sinal amostrado também é usado para realizar o teste de comparação, onde a entrada Fig. 11(B) e subtraída da referência Fig. 11(A), o resultado Fig. 11(C) é as reflexões causadas pelas discontinuidades de impedância.

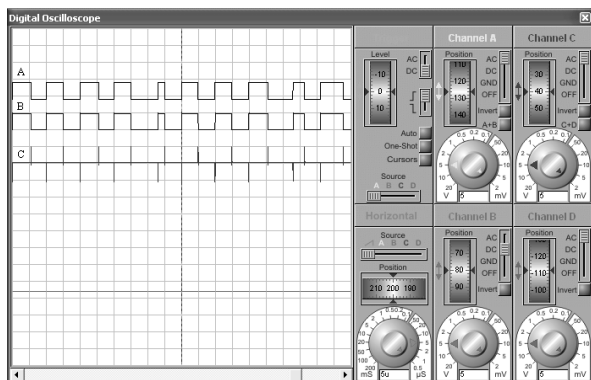


Fig. 11. (A) referência, (B) sinal amostrado e (C) resultado da comparação.

A Fig. 11(C) mostra a existência de uma diferença de fase entre os dois sinais comparados, isto é esperado, pois o mesmo sinal usado como base na comparação é usado para gerar o sinal inserido no cabo, e os componentes envolvidos provocam um atraso em relação ao sinal original. Esse problema foi resolvido com a aplicação de um filtro passa alta em serie com a saída do comparador.

A Fig. 12 exibe o resultado para a simulação do TDR, onde um pulso de curta duração é emitido e há uma reflexão positiva. Esta simulação destina-se a validação do identificador.

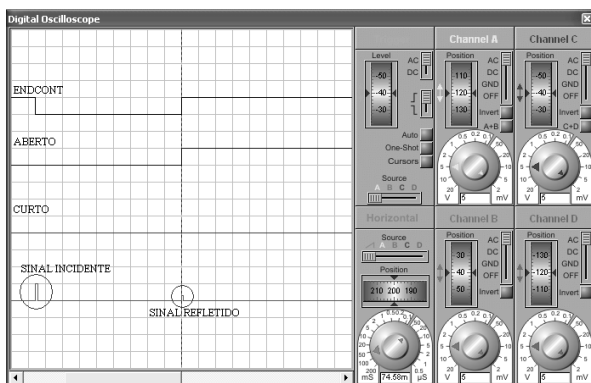


Fig. 12. Reflexão de um pulso positivo.

O sinal “ENDCONT” presente na Fig. 12 é responsável por controlar os contadores, nota-se que ele é invertido, e marca exatamente o tempo entre a emissão do pulso a sua recepção. Para este teste o sinal de “ABERTO” ficou ativo após receber o pulso, indicando que houve uma reflexão positiva.

A próxima simulação destina-se a recepção de um pulso refletido com polaridade negativa, como mostra a Fig. 13.

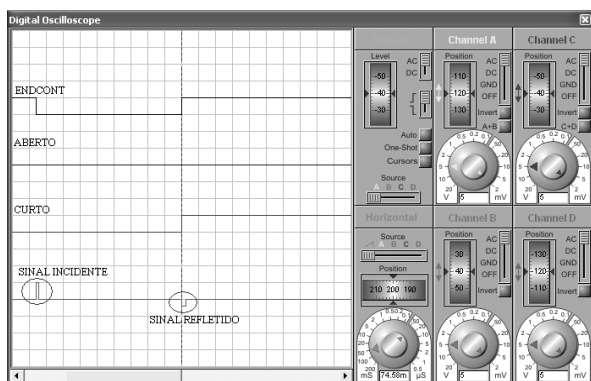


Fig. 13. Reflexão de um pulso negativo.

Para este caso, o sinal de “CURTO” ficou ativo, e o sinal “ENDCONT” iniciou e bloqueou os contadores, indiferente da polaridade do sinal refletido.

Portanto o TDR é capaz de identificar e medir a distância até um ponto de curto ou ruptura, sem a necessidade de intervenção do microcontrolador.

## 9. CONCLUSÃO

Este artigo mostrou o desenvolvimento de um analisador para cabos de rede do tipo par trançado de baixo custo que realiza os dez testes exigidos pela norma ANSI/TIA/EIA-568B. O analisador é dividido em dois equipamentos mestre e escravo. O mestre é responsável pela realização de sete dos dez testes, gerenciamento e interface com usuário. O escravo realiza os três testes restantes e transmite os resultados para o mestre.

Com base nos resultados obtidos na simulação dos blocos, Gerador e Amostragem, conclui-se que a função de transmissão e recepção do sinal está sendo realizada de forma correta, sendo que um sinal contínuo entra no conversor AD, e este é usado para medir a redução ou a interferência sofrida pelo sinal. A simulação do bloco Identificador mostra que o mesmo desempenha corretamente sua função de sinalização.

Os resultados obtidos nas simulações condizem ao esperado. O próximo passo consiste na construção de um protótipo, que visa à obtenção de resultados reais, que serão comparados com resultados de um equipamento comercial, o DSP-4000 da *Fluke*.

O objetivo deste trabalho é a redução do custo de implementação de um analisador para cabos de rede do tipo par trançado (UTP). Com base nas cotações das distribuidoras *Farnell*, *Mouser electronics* e *Digkey*, o custo estimado para produção de mil unidades do analisador seria de R\$ 700,00 por unidade.

Para trabalhos futuros, foi estudada a implantação de uma memória externa e uma porta serial para armazenar e transmitir os resultados e a implementação de um software que receberia os resultados dos testes e qualificaria o cabo testado. Existe a possibilidade de implantação de amplificadores operacionais ajustáveis, os quais seriam responsáveis pela auto-calibração do equipamento, reduzindo assim, os erros causados pela variação de temperatura.

## AGRADECIMENTOS

Os Autores deste artigo agradecem a Fundação de Apoio ao Desenvolvimento do Ensino, Ciência e Tecnologia do Estado de Mato Grosso do Sul (FUNDECT) pelo apoio financeiro.

## REFERÊNCIAS

- [1] DANTAS, Mario. *Tecnologias de redes de comunicação e computadores*. 1 ed. Axcel Books. 2002.
- [2] MENDES, Carlos Alberto B.; HENRIQUE, José da S. *Teoria das linhas de transmissão*. Artigo, (2005), disponível em [http://www.deetc.isel.ipl.pt/sistemastele/Pr1/Arquivo/Sebenta/Linhas/II\\_Teoria.pdf](http://www.deetc.isel.ipl.pt/sistemastele/Pr1/Arquivo/Sebenta/Linhas/II_Teoria.pdf). Acesso em Fevereiro de 2008.

- [3] MILLER, Gary M. *Modern Electronic Communication*. 3 ed. Prentice Hall. 1988.
- [4] ANDREWS, James R. *Time Domain Reflectometry (TDR) and Time Domain Transmission (TDT) Measurement Fundamentals*. Application Note AN-15, Picosecond Pulse Labs. Copyright November 2004.
- [5] FURUKAWA Industrial SA. Disponível em [www.furukawa.com.br](http://www.furukawa.com.br). Acesso em Fevereiro de 2008.
- [6] BONORA, Auder N.; Gimenez, Edson J. C.; Pina, Eduardo G.; Silva, Luis F. C. da; Tellaroli, Rogério L. *Valores Normalizados dos parâmetros de cabeamento estruturado metálico na certificação de redes*. Revista Científica Periódica – Telecomunicações. Vol. 5. 2002.
- [7] TANENBAUM, Andrew S. *Redes de Computadores*. 4 ed. Editora Campos, 2003.
- [8] LAN MAN Standards Committee of the IEEE Computer Society; American National Standards Institute. *Media Access Control (MAC) Parameters, Physical Layer, Medium Attachment Units, and Repeater for 100 Mb/s Operation, Type 100Base-T (Clauses 21-30)*. IEEE Std, 802.3u. 1995.
- [9] PAUL, Clayton R.; MCKNIGHT, Jack W. *Prediction of Crosstalk Involving Twisted Pairs of Wires – Part I: Transmission-Line Model for Twisted-Wire Pairs*. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. EMC-21, N.º 2, May 1979.