

TRANSMISSÃO DIGITAL DE VOZ EM LANs COM CONTROLE DE ACESSO AO MEIO CSMA/CD E PROTOCOLOS TCP/IP

Carlos Fernando Assis Paulista
RUA/DIRETA-CA-EX.P.491-CAMPINAS-SP
Fone: (019) 525977- Fax:(019) 541103.
e-mail: paulfma.embrapa.br

Rilda Carvalho de Oliveira
UNESP-IGCE-DEMAC-Cx.P.:176-13500-200 - Bto Claro-SP
Fone:(019)34-0122/R.65 - Fax: (019)34-0250
e-mail: rilda@ccm02.usp.br

Benedito Benê Fischer
UNESP-IGCE-DEMAC-Cx.P.:175-13500-200 - Bto Claro-SP
Fone:(019)34-1122/R.65 - Fax: (019)34-0250
e-mail: bfischer@ccm01.usp.br

RESUMO: Este artigo trata da transmissão digital de sinais analógicos, em especial a voz humana, em redes locais de computadores (LANs), incluindo uma análise sucinta da qualidade e eficiência com que se dá esta transmissão. O projeto SERVIDOR DE FALA apresentado visa a transmissão de sinais de áudio digitalizados, possibilitando a simulação de um sistema telefônico em uma LAN, tipo Ethernet, com facilidades adicionais.

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de computadores centralizados estão sendo rapidamente substituídos por redes de computadores, devido às facilidades que estas oferecem. Nos sistemas de redes, programas, dados e outros recursos são disponíveis a todos usuários, sem a preocupação da localização física do recurso e do usuário, proporcionando uma comunicação eficiente e confiável. Além disso, os sistemas de redes de computadores apresentam uma relação custo/desempenho superior à dos *mainframes*.

Avanços rápidos na tecnologia estão abrindo caminho para possibilitar a interconexão de vários serviços de telemática (teletexto, fac-símile, video-texto), com as facilidades oferecidas pelas redes de computadores [Mou86]. A tendência atual, portanto, é aumentar o campo de utilização dos equipamentos de rede, permitindo a transmissão de uma "mistura" de voz, dados, música e imagens.

Nesta direção, redes estão sendo projetadas para suportar voz e dados simultaneamente. É o caso da rede local (LAN) FDDI-II, compatível com a FDDI (*Fiber Distribution Data Interface*), baseada na tecnologia de fibras óticas. Com mecanismo de controle de acesso usando tecnologia "token-ring", a FDDI-II adiciona à FDDI, um serviço isócrono (tráfego de quantidades precisas em intervalos de tempo precisos). Desse modo, a FDDI-II tipicamente representa a sequência de amostras digitais de um sensor, de áudio ou vídeo.

Com a facilidade de transmissão de voz digitalizada, inúmeros serviços podem ser adicionados ao sistema de redes,

alguns dos quais são apresentados a seguir.

A partir de uma estação central, pode-se transmitir avisos falados a todas as outras estações da rede, como eventuais problemas na rede, avisos de emergência, etc.. Essa idéia permite até pensar na transmissão do som de uma estação FM, possibilitando um ambiente agradável ao usuário com "som ambiente".

Facilidades na comunicação entre grupos de pessoas também podem ser implementadas. É o caso da conhecida "rodada" entre os rádio-amadores, com esquema de câmbio, que permite a utilização de linhas de baixa velocidade. Sem o mecanismo de câmbio, tem-se uma "mesa-redonda" via rede.

Estas novas perspectivas inspiraram o projeto SERVIDOR DE FALA, que está sendo desenvolvido conjuntamente pelos autores deste artigo. O projeto visa a implementação dos serviços citados acima, em LANs, tipo Ethernet, com protocolos TCP/IP, utilizando os dispositivos de áudio, disponíveis nas estações de trabalho ligadas à rede.

Para se avaliar a qualidade da voz transmitida na rede Ethernet, a seção 2 apresenta uma breve comparação deste sistema com a conhecida transmissão telefônica. Na mesma seção, também é descrito o processo de digitalização da voz.

A seção 3 traz um levantamento sobre a transmissão dos sinais de áudio em redes com controle de acesso ao meio não-determinístico (sem tráfego isócrono), como é o caso da Ethernet.

A seção 4 descreve os principais conceitos utilizados no protótipo do sistema SERVIDOR DE FALA, composto de dois processos; seguindo a estratégia cliente-servidor.

A seção 5, por sua vez, conclui o artigo, apresentando algumas possíveis extensões do projeto SERVIDOR DE FALA.

2. TRANSMISSÃO DIGITAL DA VOZ

Diante das inúmeras facilidades que a transmissão de voz (e outros sons) traz às redes locais, é importante analisar a qualidade do som transmitido. Comparando a transmissão digital da voz humana em uma LAN tipo Ethernet, usada no projeto SERVIDOR DE FALA, com o sistema analógico de telefonia padrão, pode-se dizer que a qualidade da voz transmitida digitalmente é igual, e às vezes até superior, à da transmissão telefônica. Os fatores que levam a tal conclusão são descritos a seguir, lembrando que a especificação da Ethernet já prevê a utilização de cabos coaxiais de 50 ohms, com transmissão digital de sinais em banda básica¹.

Os cabos coaxiais apresentam maior imunidade ao ruído que os pares trançados, ainda usados nos sistemas telefônicos devido às suas pequenas dimensões físicas e grande maleabilidade. Com os avanços na tecnologia, pode-se construir hoje Ethernet com pares trançados específicos (um par de fios de cobre sem blindagem), semelhantes aos usados na rede telefônica, permitindo a convencional velocidade de 10Mbps [Com91]. Neste

¹ Os sinais digitais são "injetados" diretamente no cabo.

caso, embora o custo de implementação da rede diminua, a qualidade de transmissão, em relação a ruídos, fica equiparada nos dois sistemas.

A taxa de erros na transmissão digital dos sinais é muito menor que na transmissão analógica. Isto porque os regeneradores digitais podem restaurar um sinal "enfraquecido" ao seu valor original exato. Por exemplo, um sinal digital de 1,4V ainda é interpretado como nível lógico 1, sendo reescrito pelo regenerador como 5V. Desta forma, a transmissão digital não sofre erros acumulativos, como pode ocorrer nas chamadas telefônicas, devido aos seus amplificadores não poderem compensar as atenuações na linha de modo preciso.

Segundo Tanenbaum [Tan88], a transmissão via cabo coaxial é 10^{11} vezes melhor que a transmissão via linha discada. Este fator é obtido pela composição das razões de taxa de transmissão e de taxa de erros nos dois sistemas, como mostrado a seguir. A taxa de erros nas linhas telefônicas é de aproximadamente 1 erro por 10^6 bits enviados, variando com o equipamento de chaveamento utilizado no sistema. Já numa LAN, via cabo, a taxa de erros pode ser estimada em 1 erro por 10^{12} ou 10^{13} bits enviados. Isto resulta em uma razão entre as taxas de erros nos dois sistemas da ordem de 10^6 . Considerando a taxa de transmissão, em um cabo Ethernet, de 10^7 bps e a taxa máxima possível numa linha discada de 10^4 bps (utilizando técnicas especiais de modulação), a razão entre as duas taxas de transmissão é de 10^3 . A composição das duas razões resulta em 10^{11} .

É interessante observar que a transmissão da voz num sistema telefônico utiliza continuamente um canal de baixa largura de banda: 4KHz (3KHz para o usuário mais duas bandas de guarda de 500Hz cada). Todos os canais são multiplexados para uma banda de 60 a 108KHz, usando as técnicas FDM (*Frequency Division Multiplexing*) e TDM (*Time Division Multiplexing*) em cada banda passante. Já a transmissão digital da voz, em uma rede Ethernet, faz uso intermitente de um canal de grande largura de banda: 20MHz (consequência do Teorema de Nyquist). Esse fato se deve à característica *baseband*² de qualquer tecnologia de rede semelhante à Ethernet. A alocação do canal segue o esquema de acesso CSMA/CD (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection*), abordado na seção 3.

A possibilidade de ocorrerem *gaps* durante uma conversação existe nos dois sistemas, mas não parece preocupante. Numa linha telefônica dificilmente se terá *gaps* de minutos. Em LAN tipo Ethernet, os *gaps*, embora possam ser significativamente mais longos, também não devem trazer grandes problemas, como demonstrado na seção 3.

2.1. Processo de Digitalização da voz

Considerando que a frequência de corte da voz no sistema telefônico é de 4 KHz, segundo o Teorema de Nyquist³, é

² utilização de uma única frequência portadora, fazendo com que todas as estações da rede participem em todas transmissões.

³ Teorema que prova que um sinal arbitrário, passando por um filtro passa-baixa de largura de banda B , pode ser completamente restaurado se for amostrado por exatamente $2B$ amostras por segundo.

suficiente que se capture 8000 amostras por segundo (125µseg/amostra) dos sinais analógicos, para convertê-los numa seqüência de bits.

Os elementos necessários para essa conversão, de sinais analógicos para digitais, estão nos dispositivos de áudio associados a cada terminal da LAN. Os sinais analógicos são recebidos pelo canal de entrada de um dispositivo de áudio, que também contém um canal de saída de sinais analógicos (conversão digital-analógica). O sistema do Projeto SERVIDOR DE FALA foi implementado sobre estações SPARC da Sun Microsystems, Inc., utilizando-se o "device-áudio" disponível nessas estações. Esse dispositivo controla os canais de entrada e saída de som usando o chip "AM79C30A Digital Subscriber Controller", podendo gerenciar, através de software, tanto a entrada de um microfone (sempre necessário), como a saída de um fone de ouvido ou do alto-falante interno da estação.

Os dados de áudio amostrados são digitalizados e enviados (como pacotes) de uma estação transmissora a uma receptora (destinatária). Geralmente se faz uso de técnicas de compactação sobre os dados digitalizados, de modo a se reduzir o número de bits necessários no canal. No caso das estações SPARC, os dados são digitalizados com 12 bits de precisão, apesar de existirem estudos mostrando que, nesta freqüência, precisa-se de 13 bits de resolução, para cobrir todo o espectro da fala humana [Nel92]. Os 12 bits são então comprimidos para amostras de 8 bits usando o código "u-law", que é uma técnica de compressão do tipo "Delta-Modulation", a qual considera, não a amplitude do sinal digitalizado, mas a diferença entre o valor corrente e o valor anterior [Tan88].

É interessante observar que o fato de transmitir dados de áudio, juntamente com outros dados, não onera o tráfego na rede, visto que os "pacotes de áudio" transmitidos são pequenos (1024 bytes) e a taxa de transmissão é de apenas 64Kbits/seg⁴, ou seja, 6,4% da capacidade da rede. A probabilidade de mais de dois pares de estações estarem "conversando" simultaneamente é pequena. Desta forma, a sobrecarga na rede devido à transmissão de voz é menor que 10% e portanto, bastante aceitável. Contudo, se 14 estações estiverem "conversando" duas a duas (128Kbits/seg por par), chega-se à utilização de quase toda a capacidade da rede.

3. COMUNICAÇÃO ISÓCRONA SOBRE CSMA/CD

Para assegurar que a voz chegue a uma estação destino, é necessário que a taxa de 64Kbits/seg (sub-seção 2.1) não seja violada, isto é, a rede deve providenciar um tráfego isócrono⁵ dos pacotes de dados de áudio. Redes como a Token-bus, Token-ring e FDDI possuem um controle preciso do tempo de transmissão de um pacote pela rede (caráter determinístico), garantindo a taxa desejada. Ainda, algumas destas redes possuem controle de

⁴ 8000 amostras/seg * 8 bits/amostra = 64Kbits/seg.

⁵ Tráfego de uma quantidade precisa em intervalos de tempo precisos.

prioridade dos frames a serem transmitidos, possibilitando que se estabeleça uma prioridade para os dados referentes à voz. A Ethernet, entretanto, devido à sua difusão broadcast, com o controle de acesso ao meio CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection), não possui nenhum mecanismo preciso para controle de tempo na transmissão de um pacote.

O protocolo CSMA/CD é gerenciado pela subcamada MAC (Medium Access Control), da camada de enlace de dados (Data Link Layer), de acordo com o modelo de referência OSI (Open Systems Interconnection). Segundo o CSMA/CD, a estação verifica ("ouve") o sinal da portadora, para saber se o duto está livre ou não. Caso esteja ocupado, a estação espera que o duto se torne livre e transmite. Para que uma estação se certifique que (só) ela assumiu o canal, é necessário um tempo de 2τ para o sinal da portadora "informar" à toda rede que o duto está ocupado (τ é o tempo necessário para se percorrer o duto em um sentido - atraso de propagação): deve-se levar em conta os delays impostos pelos repetidores, se houver. Caso neste tempo 2τ uma ou mais estações também inicie uma transmissão (para ela o duto estava livre), haverá colisão. Para assegurar que a informação de colisão chegue à todas estações envolvidas, o Gerenciador de Acesso ao Meio de Transmissão aumenta a colisão, transmitindo uma seqüência de 512 bits (64bytes), conhecida como slot-time. Cada uma destas estações deve, então, esperar um tempo aleatório para transmitir novamente, tempo este dado por um número inteiro r de intervalos de tempo τ , $0 \leq r \leq 2^{n-1}$, onde n é o número de tentativas consecutivas de transmissão (colisões). Após um número máximo n de tentativas sem sucesso, o nó aborta a transmissão. Esta distribuição aleatória tem por objetivo minimizar a probabilidade de nova colisão no momento da retransmissão. O modelo conceitual do protocolo CSMA/CD está esquematizado na figura 1.

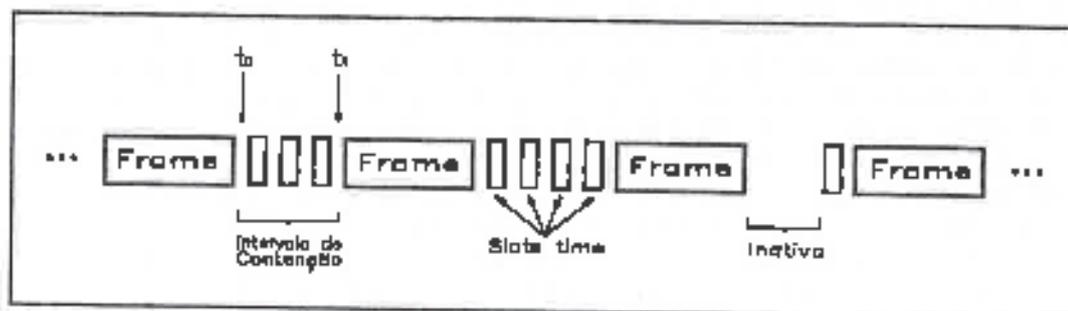


Figura 1. Modelo conceitual do protocolo CSMA/CD

Na Ethernet, o tempo escolhido para o slot time é de $51,2\mu\text{seg}$, o equivalente a 512 bits, devido à extensão máxima da rede, de 2,5Km. Neste tempo foi considerado, além dos $2\tau = 25\mu\text{seg}$, o delay de $26,2\mu\text{seg}$ entre os repetidores.

O número máximo de tentativas de transmissão considerado na Ethernet é de $n = 16$. Como podem ocorrer colisões sucessivas até o limite das retransmissões (caso em que o pacote não será enviado), o protocolo CSMA/CD não é determinístico. Isso pode ocasionar gaps durante a sessão de comunicação entre 2 usuários, caso não seja mantida a taxa de transmissão de 128Kbits/seg (64Kbits/estação), devido aos intervalos de contenção.

Para transmitir um pacote de dados de áudio à taxa de

10Mbps, sem colisões, são necessários aproximadamente 6,6 mseg. A tolerância de tempo previsível para colisões (≈ 993 mseg) é relativamente grande, quando se exige uma taxa de 64Kbits em 1000 mseg. Isso permite um intervalo de contenção de 19394 slots *time*, o que é uma situação pouco provável, mesmo com muitas estações na rede. Considerando uma sessão de comunicação entre 2 estações, os 128Kbits necessários deverão ser transmitidos em aproximadamente 13,1mseg, restando, ainda, uma margem razoável de tempo para o intervalo de contenção. Desta forma, garantidas as taxas acima, o protocolo CSMA/CD propicia uma comunicação praticamente isócrona, desde que não haja muitas estações transmitindo voz e o tráfego na rede não esteja excessivamente alto.

4. O SISTEMA SERVIDOR DE FALA

Sob o patrocínio do DARPA (*Defense Advanced Research Projects Agency*), a Universidade da Califórnia, em Berkeley, acoplou ao sistema operacional UNIX BSD⁶ 4.X, a facilidade de comunicação entre processos conhecida como *socket*⁷. Esta abstração de comunicação permite a conexão entre processos pertencentes a um mesmo domínio de comunicação. Os domínios mais usados são o UNIX, que permite conexão entre os processos de uma mesma máquina, e o domínio INTERNET, que permite a comunicação entre processos de diferentes máquinas, usando os protocolos TCP/IP. Existem vários outros domínios, como o PUP, CHAOS, SNA, DECnet, etc., que são mais específicos ou associados à solução de um fabricante.

O sistema SERVIDOR DE FALA está implementado no domínio INTERNET, o qual define o formato dos endereços utilizados. Neste domínio, há dois tipos de conexão: *datagrama* e *stream*. O *datagrama* provê um mecanismo de comunicação não-confiável, não-orientado à conexão, mas sim à transmissão de pacotes (protocolo UDP). A conexão do tipo *stream*, por outro lado, permite um fluxo de comunicação confiável e orientado a conexão (protocolo TCP).

A utilização de um serviço não-confiável foi considerada a mais adequada ao projeto, a fim de se evitar atrasos na transmissão da voz, devido ao reconhecimento (*acknowledgement*) de cada pacote, como ocorre em um sistema confiável. Além disso, considerou-se o alto grau de desempenho da rede Ethernet (ver Anexo 2), permitindo "ignorar", de certa forma, os possíveis problemas acarretados pela falta de reconhecimento. Um desses problemas é a perda de um ou outro pacote transmitido. Isto, entretanto, não afeta tragicamente a comunicação. Basta comparar este evento com outros ocorridos num sistema telefônico padrão, como, por exemplo, a "perda de alguns trechos de fala" devido a incidência de descargas elétricas. Nada que não possa ser resolvido com um simples "o quê?" do ouvinte e conseqüente repetição dos dados por parte de quem fala.

Para suportar o fluxo de dados bidirecional, de modo não-confiável, foi criado um *socket* do tipo *datagrama*. Este tipo de *socket* providencia uma interface simétrica para a troca de dados

⁶ Berkeley Software Distribution.

⁷ Sistema de abstração que permite que programas de abstração acessem protocolos de comunicação.

entre duas estações, sem impor requisitos para o estabelecimento da conexão, mesmo se tratando de processos cliente-servidor. Ao invés disso, cada mensagem (pacote) deve ser acompanhada do par de endereços de origem e de destino, em contraste com os *sockets stream*, que usam a técnica de circuito virtual^a para conexão.

Para se providenciar a conexão entre duas estações, utilizando datagramas, o projeto *SERVIDOR DE FALA* conta com dois processos: um cliente, *SPEAK*, e um servidor, *SPEAKD*. Estes processos devem ser executados nas máquinas origem e destino, respectivamente, estabelecendo a sessão de comunicação.

Normalmente, o processo servidor de um recurso é ativado pelo "boot" do sistema operacional (usando os arquivos *rc* e *rc.local*), continuando ativo durante todo o tempo de execução do sistema. Dois exemplos dessa classe são os processos "lpr", gerenciador de impressão, e o "sendmail", gerenciador de correio eletrônico. Outra classe de processos servidores usa o processo "inetd" para inicialização, o qual verifica as conexões de alguns *sockets*, previamente programados, em seus arquivos de configuração. Quando a conexão é encontrada em um dos *sockets*, ele decide qual o serviço que corresponde àquele *socket* e chama o programa que processa a requisição do serviço.

O processo servidor *SPEAKD* poderia ser ativado segundo um dos métodos acima. Todos os dois métodos foram testados e apresentaram bom desempenho.

A inicialização do processo *SPEAK*, por sua vez, foi modelada pelo comando *talk*. Como só há um dispositivo de áudio em cada estação SUN, a forma de comunicação é estabelecida, não por usuário, como no comando *talk*, mas sim, por estação.

4.1. Conexão Cliente-Servidor

A conexão entre os processos *SPEAK* e *SPEAKD* é possível graças à portas criadas pelos processos, sobre um *socket* definido no sistema, para recepção e envio de mensagens. A porta local usada pelo processo servidor, *SPEAKD*, é "bem conhecida" (*well-known-port*), de número 1200, enquanto o processo *SPEAK* usa uma porta disponível na estação (figura 2). Quando ativado, o processo *SPEAK* define um *socket*, enviando esta informação para o servidor *SPEAKD*, que já deve estar sendo executado na máquina-destino especificada. Neste momento, *SPEAKD* tenta alocar o dispositivo de áudio para saída do som. Se a tentativa é bem sucedida, ele envia um sinal de reconhecimento para o processo *SPEAK*. Este sinal deve ser enviado num intervalo de tempo pré-determinado, caso contrário, a sessão é abortada. Recebida a resposta esperada, *SPEAK*, na máquina-origem, passa a transmitir continuamente pacotes de som digitalizado para *SPEAKD*, na máquina-destino, de acordo com o diagrama da figura 2. Os pacotes de som recebidos por *SPEAKD* são, então, reproduzidos no dispositivo de áudio da estação. Caso o processo servidor não receba tais pacotes durante um certo tempo fixado, ele assume que a execução do processo par (*SPEAK*) já terminou e encerra a conexão entre os processos. A sessão é normalmente

^a Quando uma conexão é efetivada, um caminho físico dedicado é estabelecido entre a fonte e o destino, só depois desse evento os dados podem ser transmitidos. Os pacotes contém números pequenos de circuitos ao invés de endereços de destino.

terminada quando SPEAK transmite um pacote especial, indicando o final da sessão para SPEAKD.

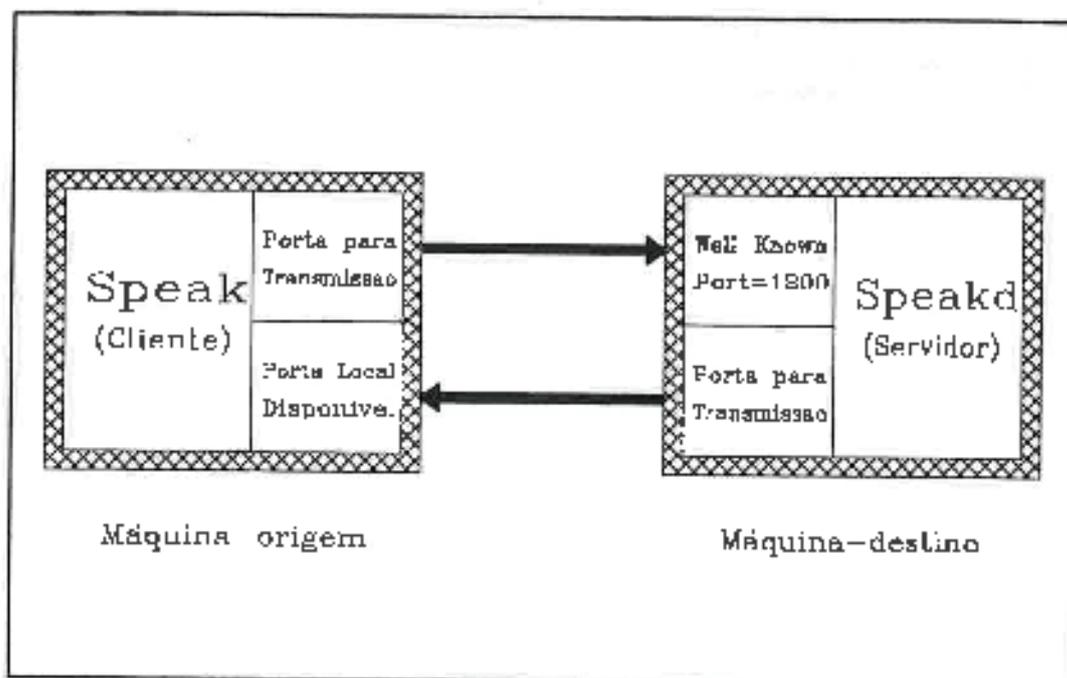


Figura 2. Comunicação entre os processos SPEAK e SPEAKD

4.2. Modos de Operação

O sistema SERVIDOR DE FALA pode ser operado de dois modos, descritos a seguir.

No primeiro, emula-se um sistema telefônico, com conexões par a par, onde um usuário da rede, em uma estação, pode manter uma conversação com outro usuário.

No segundo modo, permite-se conexões de um processo cliente com vários processos servidor. Essa facilidade possibilita a transmissão broadcast de mensagens à rede ou a um grupo de pessoas (transmissão multicast). Este modo pode ser usado para transmitir mensagens faladas para todos os usuários (aviso de desligamento do sistema, repetição de mensagens gravadas, etc.) ou para conversa em grupo.

5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste artigo foi apresentada uma análise comparativa da transmissão digital da voz humana em uma rede Ethernet, com protocolo TCP/IP, bem como o projeto, aplicativo desta facilidade, SERVIDOR DE FALA, em desenvolvimento pelos autores deste trabalho.

O protótipo do sistema foi implementado em estações de trabalho SPARK e testado em conversação entre dois usuários em laboratórios fisicamente separados. Os testes iniciais apresentaram um retardo na comunicação, proporcional ao tamanho do pacote de dados digitalizados transmitidos na rede (quanto menor o pacote menor o retardo). Este problema foi eliminado com a redução do tamanho do pacote para o valor ótimo de 1Kbyte.

Nestas condições, os testes revelaram que o sistema ficou completamente funcional, com a qualidade de uma linha telefônica normal. O SERVIDOR DE FALA também foi testado em condições de operação normal da rede, com vários usuários, a maioria deles usando NFS (*Network File System*), sem apresentar perda de qualidade na transmissão.

O desempenho do sistema SERVIDOR DE FALA permite concluir que, apesar do não-determinismo da rede Ethernet (protocolo CSMA/CD), é possível a utilização de sistemas que requerem protocolos de caráter determinístico sobre a rede. Isto ocorre quando a taxa de uso da LAN não é muito elevada, pois, nestas condições, a Ethernet apresenta característica aproximadamente isócrona (seção 3).

No estágio atual, o SERVIDOR DE FALA não efetua nenhum pré-processamento sobre os dados digitalizados, visando a otimização do tráfego de dados na rede. Desta forma, o sistema deverá ser "refinado" relativamente à compactação do som e eliminação de silêncio nos dados digitalizados, permitindo que a comunicação se torne *half duplex* e, conseqüentemente, diminuindo o tráfego de informações na rede.

Com a popularização das placas de som e multimídia nos PC's (como por exemplo as placas SOUNDBLASTER), estes podem ser integrados a sistemas compostos por estações de trabalho SPARK, participando, também, da transmissão de som via rede. Para isto, basta adaptar o SERVIDOR DE FALA ao ambiente PC.

Outra perspectiva do projeto, é alterar o sistema SERVIDOR DE FALA, para que o mesmo opere em redes com outros meios de comunicação, como, por exemplo, a FDDI, ou meios com linhas seriais de alta velocidade.

Agradecimentos ao Prof. Dr. Edson dos Santos Moreira do IONSC/JSP-São Carlos-SP, pelo apoio e incentivo a este trabalho.

BIBLIOGRAFIA

- [Com91] COMER, D.E. *Internetworking with TCP/IP Volume I: Principles, Protocols, and Architecture*. Prentice-Hall International Editions, 2nd ed., 1991, 547p.
- [Gio86] GIOZZA, W.F. *Redes Locais de Computadores - Tecnologia e Aplicações*. McGraw-Hill Ltda., 1^a ed., 1986, 399p.
- [Lef90] LEFTER, S. et. al. *The Design and Implementation of the 4.3 BSD UNIX Operation System*. Addison-Wesley Publishing Company Inc., 1990, 471p.
- [Mou86] MOURA, J.A.B. et. al. *Redes Locais de Computadores - Protocolos de Alto Nível e Avaliação de Desempenho*. McGraw-Hill Ltda, 1^a ed., 1986, 446p.

- [Nel92] NELSON, M. The Data Compression Book, M&T Books - A Division of M&T Publishing Inc., 1992, 527p.
- [Sun90] Manuais da estação SPARK da Sun Microsystems, Inc., 1990: Networking Programming Guide; SunOs Reference Manual - Vols. II e III; System & Network Administration.
- [Tan88] TANENBAUM, A.S. Computer Networks, Prentice-Hall International Editions, 2nd ed., 1988, 658p.
- [Tar86] TAROUCO, L.M.R. Redes de Computadores Locais e de Longa Distância. McGraw-Hill Ltda., 1986, 353p.