

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE CAMPINAS

CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E
AMBIENTAIS E DE TECNOLOGIA

ADENILSON BOCCATO DE ALMEIDA

MEDIÇÃO DE QUALIDADE DE VOZ EM WIRELESS
UTILIZANDO CODECS G711, G729, G723 e GSM.

CAMPINAS

2008

ADENILSON BOCCATO DE ALMEIDA

MEDIÇÃO DE QUALIDADE DE VOZ EM WIRELESS
UTILIZANDO CODECS G711, G729, G723 E GSM.

Dissertação apresentação como exigência para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica ao Programa de Pós-Graduação na área de concentração Gestão de Redes e Serviços, Pontifícia Universidade Católica de Campinas.

Orientadora. Prof. Dra. Norma Reggiani

PUC-CAMPINAS

2008

<INCLUIR NO VERSO DA PÁGINA ACIMA>

Ficha Catalográfica
Elaborada pelo Sistema de Bibliotecas e
Informação - SBI - PUC-Campinas

t621.3845 Almeida, Adenilson Boccato de.

A447m

Medição de qualidade de voz em Wireless utilizando Codecs G711, G729, G723 e GSM / Adenilson Boccato de Almeida. - Campinas: PUC-Campinas, 2008. 87p.

Orientadora: Norma Reggiani.

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias, Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

Inclui anexos e bibliografia.

1. Sistemas de comunicação sem fio. 2. Sistemas de comunicação móvel. 3. Codificador de voz. 4. Sistemas de telecomunicação. 5. Engenharia elétrica. I. Reggiani, Norma. II. Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias, Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE CAMPINAS

GRÃO-CHANCELER

Dom Bruno Gamberini

MAGNÍFICO REITOR

Prof. Pe. Wilson Denadai

VICE-REITORA

Prof.a. Dra. Ângela de Mendonça Engelbrecht

PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

Prof.a. Dra. Vera Engler Cury

**DIRETOR DO CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS, AMBIENTAIS E DE
TECNOLOGIAS**

Prof. Dr. Orandi Mina Falsarella

**COORDENADOR DO PROGRAMA DE
PÓS-GRADUAÇÃO STRICTO SENSU EM ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE MESTRADO PROFISSIONAL EM GESTÃO DE REDES DE
TELECOMUNICAÇÕES**

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: GESTÃO DE REDES E SERVIÇOS

Prof. Dra. Norma Reggiani

ADENILSON BOCCATO DE ALMEIDA

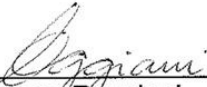
**" MEDIÇÃO DE QUALIDADE DE VOZ EM WIRELESS
UTILIZANDO CODECS G711, G729, G723 E GSM"**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Profissional em Gestão de Redes de Telecomunicações do Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias da Pontifícia Universidade Católica de Campinas como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Gestão de Redes de Telecomunicações.

Área de Concentração: Gestão de Redes e Serviço.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Norma Reggiani

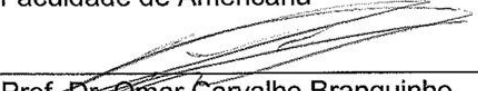
Dissertação defendida e aprovada em 18 de dezembro de 2008 pela Comissão Examinadora constituída dos seguintes professores:



Prof.^a Dr.^a Norma Reggiani
Orientadora da Dissertação e Presidente da Comissão Examinadora
Pontifícia Universidade Católica de Campinas



Prof. Dr. Carlos Henrique Rodrigues de Oliveira
Faculdade de Americana



Prof. Dr. Omar Carvalho Branquinho
Pontifícia Universidade Católica de Campinas

Ao meu pai, de quem me lembro quando preciso de sabedoria e equilíbrio.
À minha mãe, em quem me baseio quando preciso de paciência.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus primeiramente, por todas as oportunidades que me foram oferecidas.

A Prof. Dra. Norma Reggiani, pela valiosa orientação e pelo sempre pronto apoio em todos os momentos.

Ao Prof. Dr. David Bianchini pelas importantes sugestões.

Ao Prof. Dr. Omar Branquinho pelo apoio e colaboração técnica.

Ao meu irmão André pela revisão de vernáculo.

Agradeço também a Expresso Limeira cujo apoio financeiro permitiu a realização deste trabalho.

Aos professores e colegas do curso de mestrado, pela amizade e aprendizado.

“Somos o que fazemos de forma repetitiva.
Excelência então não é um ato, mas um hábito.”

Aristóteles
(384-322 AC)

RESUMO

ALMEIDA, Adenilson Boccato, Medição de Qualidade de voz em Wireless utilizando os codecs G711,G729,G723 e GSM. 2008. Dissertação (Mestrado em Gestão de Redes de Telecomunicações) – Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas 2008.

Esta dissertação analisa a qualidade da transmissão do VoIP (Voz sobre IP) em rede WLAN (Wireless Local Área Network). Para atingir esse objetivo foram realizados testes em bancada utilizando os codecs de voz G729, G711, G723 e GSM analisando suas características de atraso e perda de pacotes. O trabalho apresenta resultados que indicam o efeito dos fenômenos de instabilidade das redes sem fio no desempenho do VoIP. Essas variações revelam alterações significativas na qualidade da voz em função do ambiente utilizado e da distância entre o emissor e receptor.

Palavras Chaves

Voz sobre IP, Voz sobre Redes sem Fio, Codec de voz.

ABSTRACT

ALMEIDA, Adenilson Boccato, measurement of quality of a wireless voice codecs using the G711, G729, G723 and GSM. 2008 Dissertation (Masters in Management Network Telecommunications) - Post-Graduate in Electrical Engineering, Center of Exact Sciences, and Environmental Technologies, Pontifical Catholic University of Campinas, Campinas 2008.

This dissertation examines the quality of the transmission of VoIP (Voice over IP) in wireless LAN (Local Area Network Wireless). To achieve this objective tests were performed on the bench using voice codecs G729, G711, G723 and GSM analyzing characteristics of delay and loss of packets. The paper presents results that indicate the effect of the phenomena of instability of wireless networks in the performance of VoIP. These variations show significant changes in the quality of voice depending on the used environment and the distance between the transmitter and receiver.

Key Works

Voice over IP, VoIP over Wireless Local Area, Coder, Decoder.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Evolução das redes sem fio	23
Figura 2. Fluxo básico de dados de voz em um sistema VoIP.....	30
Figura 3. Fatores que influenciam a percepção da qualidade da voz.....	30
Figura 4. Exemplifica o fator <i>Jitter</i> numa rede de pacotes.....	32
Figura 5. Valores MOS em função da taxa de transmissão de bits.....	34
Figura 6. Atrasos na transmissão de um sinal	36
Figura 7. Diagrama de blocos simplificado da codificação CS-ACELP	39
Figura 8. Bancada de testes.....	47
Figura 9. Bloco de Controle.....	48
Figura 10. Cenário de testes	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Escala de qualidade do som ouvido para testes de ACR.....	33
Tabela 2. Relação entre Fator R e MOS	35
Tabela 3. Fator de Atenuação para ambientes	45
Tabela 4. Desvio padrão da variável aleatória.....	45
Tabela 5. Resumo de <i>Jitter</i> em ms.....	51
Tabela 6. Fator R dos Codecs nos Cenários de teste.....	53
Tabela 7. Taxa de transmissão e payload.....	54

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Distribuição de Weibull para $\alpha = 2$ e $\beta = 1,26$	46
Gráfico 2. Distribuição de Weibull para $\alpha = 2$ e $\beta = 1,34$	47
Gráfico 3. Jitter x número de pacotes transmitidos no Cenário 1	50
Gráfico 4. Jitter x número de pacotes transmitidos no Cenário 2.....	50
Gráfico 5. Jitter x número de pacotes transmitidos no Cenário 3.....	51
Gráfico 6. Porcentagem de pacotes perdidos no Cenário 1	52
Gráfico 7. Porcentagem de pacotes perdidos no Cenário 2.....	52
Gráfico 8. Porcentagem de pacotes perdidos no Cenário 3.....	53
Gráfico 9. Curva PER x BER	54
Gráfico 10. Fator R x Cenários.....	55
Gráfico 11. Jitter x Cenários.....	56
Gráfico 12. Perda de Pacotes x Cenários	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACR	=	Classes of Absolute Category
ADPCM	=	Adaptive Differential Pulse code Modulation
AP	=	Access Point
ARQ	=	Automatic Repeat ReQuest
AT&T	=	American Telephone and Telegraph
AVC	=	Advanced Video Coding
AWGN	=	Additive White Gaussian Noise
BER	=	Bit Error Rate
CCITT	=	Comite Consultatif International of Telegraphie and Telephone
CODEC	=	Coder Decoder
CS-ACELP	=	Conjugate Structure Algebraic Code Excited
FCC	=	Federal Communications Commission
IEEE	=	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IP	=	Internet Protocol
ITU-T	=	International Telecommunications Union
LBS	=	Location Based Service
LD-CELP	=	Low Delay Code Excited Linear Prediction
LPC	=	Encoders by Linear Prediction
MAC	=	Medium Access Control
MIMO	=	Multiple-Input Multiple-Output
MOS	=	Mean Opinion Score
MNRU	=	Unit to be Adjusted for Noise
MP-MLQ	=	Multipulse Maximum Likelihood Quantization
NDIS	=	Network Driver Interface Specification
PER	=	Packet Error Rate
PC	=	Personal Computer
PCM	=	Pulse-code modulation
PCMCIA	=	Personal Computer Memory Card International Association
PSK	=	Pre-Shared Key
QoS	=	Quality of Service
RF	=	Radio Frequência
RTCP	=	Real-Time Transport Control Protocol
RTP	=	Real-Time Transport Protocol
SNMP	=	Simple Network Management Protocol

SNR	=	Signal-to-noise ratio
UDP	=	User Datagram Protocol
VAD	=	Voice Activity Detection
VoIP	=	VoIP over IP
VoWiFi	=	VoIP over Wi-Fi
WEP	=	Wired Equivalent Private
WFA	=	Wi-Fi Alliance
WiFi	=	Wireless Fidelity
Wi-Max	=	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WLAN	=	Wireless Local Area Network
WNIC	=	Wireless Network Interface Card
WPA	=	Wi-Fi Protected Access

SUMÁRIO

1.1	Contextualização do Problema.....	18
1.2	Objetivo Geral	20
1.3	Metodologia.....	21
1.4	Resultados esperados.....	21
1.5	Organização da dissertação.....	21
1.6	Trabalhos futuros	22
2	Introduções às redes IEEE 802.11	22
2.1	Cronologia de desenvolvimento do padrão IEEE 802.11	23
2.2	Modos de operação: infra-estruturado e <i>ad hoc</i>	25
2.3	O futuro de IEEE 802.11	26
3	QUALIDADE DE SERVIÇO EM VOIP.....	27
3.1	Voz sobre redes IEEE 802.11	27
3.2	Processo de transmissão de voz comunicação	28
3.3	Requisitos das aplicações de VoIP	30
3.3.1	Latência	31
3.3.2	<i>Jitter</i>	31
3.3.3	Taxa de perda de pacotes	32
3.3.4	Vazão.....	33
3.3.5	MOS.....	33
3.3.6	Fator R.....	35
4	CODIFICADORES RELEVANTES AO TRABALHO.....	36
4.1	PER e BER.....	37
4.2	G.711	37
4.3	G.729	38
4.4	G.723.1	40
4.5	GSM.....	42
5	ANÁLISE DA QUALIDADE DE SERVIÇO EM WLAN COM OS CODECS G729, G711, G723 e GSM	43
5.1	Modelo de Shadowing.....	43
5.2	Distribuição de Weibull.....	45
5.3	Bancada de emulação.....	47

6 RESULTADOS.....	50
7 CONCLUSÃO.....	57
REFERÊNCIAS.....	58
ANEXOS.....	62
APÊNDICES.....	75

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização do Problema

Em 1994, o pesquisador Randy H. Katz afirmou que a transmissão de multimídia seria um desafio para os sistemas sem fio (KATZ, 1994). A preocupação de Katz, que continua presente nos dias atuais, advinha principalmente de um fator: as aplicações multimídia e os ambientes móveis nasceram pressionados por forças diametralmente opostas. Os ambientes móveis, devido aos requisitos de mobilidade e autonomia, caracterizam-se pela economia de recursos. Por outro lado, as aplicações multimídia, devido aos requisitos de qualidade, caracterizam-se pela alta demanda de recursos.

Com os últimos avanços tecnológicos em redes sem fio e codificação de voz e vídeo, a afirmação feita por Katz em 1994 hoje poderia ser outra. Foram lançadas novas tecnologias de rede sem fio — tais como IEEE¹ 802.11² (IEEE99, 1999), IEEE 802.16³ (WiMax) (IEEE04, 2004) e Bluetooth (Blu03, 2003) — e de redes celulares de dados (INT03, 2003). As redes sem fio evoluíram não apenas em termos de capacidade de transmissão, mas também em confiabilidade e área de cobertura; atualmente, nas grandes cidades brasileiras, praticamente toda a área urbana é coberta por pelo menos uma alternativa de conectividade sem fio. Além disso, em paralelo ao desenvolvimento das redes sem fio, as tecnologias de codificação e transmissão de voz também evoluiu. A transmissão de voz, hoje, graças aos avanços em tecnologias de codificação, pode ser feita usando-se bem menos banda passante do que seria necessário há dez anos; as aplicações de voz, por sua vez, já estão presentes no cotidiano de muitos usuários de Internet. Apesar do rápido avanço em relação a tecnologias isoladas, H.264/AVC e IEEE 802.11, a integração entre as tecnologias de multimídia e as de redes sem fio não avançou na mesma velocidade. Em outras palavras, mesmo dez anos depois de Katz tê-lo afirmado, a transmissão de voz sobre redes sem fio continua sendo um dos principais desafios tecnológicos da atualidade, além da integração dessas tecnologias.

¹ Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos é uma organização profissional sem fins lucrativos, fundada nos Estados Unidos.

² As redes locais com conexão Ethernet sem fio têm seus protocolos definidos nas recomendações IEEE 802.11.

³ O padrão 802.16 define uma interface aérea *Wireless*, ou seja uma Rede Metropolitana sem Fio.

Integrar as tecnologias de multimídia as redes sem fio implica em construir arquiteturas adaptativas (CAMPBELL, 2001) capazes de otimizar o uso de recursos como banda passante, capacidade de processamento e de armazenamento, consumo de energia, latência de comunicação, qualidade de percepção visual e auditiva, entre outros (MENIN, 2002). Pode-se afirmar que ainda não existem estratégias adaptativas que funcionem para todos os Cenários de utilização das aplicações multimídia sobre redes sem fio (soluções *one-size-fits-all*). Desse modo, decidimos analisar os Cenários mais relevantes para a realidade atual dos usuários; e dentre esses Cenários certamente destacam-se as redes IEEE 802.11 e as aplicações de Voz sobre IP (VoIP).

As redes sem fio IEEE 802.11, também conhecidas como redes Wi-Fi, tornaram-se o padrão em conectividade sem fio para redes locais e já equipam a maioria dos computadores portáteis novos; é possível afirmar que os acessos sem fio a Internet, em sua maioria, já são feitos através dessas redes. Além disso, as aplicações de VoIP é uma das que mais cresceram em utilização nos últimos anos. VoIP destacou-se por oferecer uma alternativa de baixo custo, ou mesmo gratuita, às ligações telefônicas. Ou seja, a motivação para escolher estudar essas tecnologias, Wi-Fi⁴, e VoIP, está sobretudo relacionada a sua ampla e crescente utilização.

A qualidade da voz que trafega sobre IP, depende de parâmetros tais como: codec de voz que é utilizado, a variação do atraso (*jitter*), o atraso fim-a-fim (*delay*)⁵ e a perda de pacotes. Dentre esses fatores mencionados, com exceção do *codec* (*Coder Decoder*), todos estão relacionados a rede de transporte.

Além da rede de transporte Wi-Fi 802.11b não garantir QoS, o protocolo IP que é utilizado para o encaminhamento da informação também apresenta suas limitações para essa função. O IP⁶ fornece um serviço de melhor esforço, isto é, não faz nenhuma promessa sobre o atraso fim-a-fim para um pacote individual e muito menos quanto à variação do atraso dentro de uma corrente de pacotes (KUROSE, 2003). Verifica-se que o IP foi projetado inicialmente para o transporte

⁴ Licenciada originalmente pela Wi-Fi Alliance para descrever a tecnologia de redes sem fios embarcadas (WLAN) baseadas no padrão IEEE 802.11.

⁵ Termo técnico usado para designar o retardo de sinais em circuitos electrónicos.

⁶ Protocolo responsável por realizar o encaminhamento dos pacotes de voz, trata-se de uma tecnologia simples e popularizada, que atualmente integra redes cada vez maiores.

de dados e não para o transporte de voz que é uma aplicação extremamente sensível ao atraso fim-a-fim. Além disso, não há distinção do conteúdo do que está sendo transportado (por exemplo, voz e texto são tratados na mesma forma), não oferecendo, portanto, qualquer garantia de que a voz chegará ao destino segundo exigências específicas desse serviço, isto é, o IP não oferece QoS. (COLCHER, 2005)

Existem diversos trabalhos direcionados a avaliar a qualidade da comunicação usando a tecnologia VoIP em Wireless. Os trabalhos de Kushman et al. (2007), Levy e Zlatokrilov (2006) e Markopolou et al. (2003) analisam fatores que podem influenciar no desempenho de uma comunicação usando VoIP, tais como o ambiente utilizado, parâmetros como *Jitter* e taxas de erro.

Existem ainda trabalhos que apresentam modelos que permitem avaliar a qualidade da voz transmitida (Lakaniemi et al. 2001; Lustosa et al. 2004) ou que apresentam uma avaliação dos aparelhos de comunicação em relação à qualidade da voz (WECA), utilizando como parâmetro o MOS e fator R do modelo E.

Este trabalho é a ampliação do trabalho realizado em 2007 por Bandeira A. que estudou a qualidade da voz em Wireless utilizando os codecs G711 e GSM. Nesse trabalho serão estudados também os codecs G723 e G729.

1.2 Objetivo Geral

Diante do contexto colocado, o objetivo deste trabalho é investigar o comportamento da transmissão de voz sobre redes IEEE 802.11. Mais especificamente o trabalho é direcionado aos codecs G729, G711, G723 e GSM verificando os mais adequados para trabalhar em redes sem fio e qual o desempenho neste meio.

1.3 Metodologia

O método utilizado para alcançar os resultados pode ser resumido em duas partes: o estudo bibliográfico para que haja uma fundamentação teórica e um conhecimento das tecnologias abordadas. Nesta parte, foram estudados desde o princípio do VoIP, os *codecs* utilizados e as características no meio utilizado que são as redes sem fio IEEE 802.11.

A segunda etapa é de experimentos que avaliam a qualidade do VoIP em rede Wireless. Nessa etapa foi utilizado o Laboratório de Pesquisas em Sistemas Radio (LP-SiRa) da PUC-Campinas financiado pela FINEP, que dispõe de uma bancada de testes que emula a rede sem fio através de cabo coaxial e na qual foi caracterizado o desempenho dos *codecs* G711, G729, G723 e GSM através do fator R, do *jitter* e da perda de pacotes.

1.4 Resultados esperados

Por meio da análise da qualidade de voz, pretende-se caracterizar o comportamento do VoWiFi⁷ em Cenários reais. Este trabalho pretende definir entre os *codecs* de voz G729, G711, G723 e GSM o mais adequado para um ambiente de rede sem fio, que apresente mobilidade do usuário, diversos níveis de obstrução e conseqüentemente pouca qualidade de sinal.

Este trabalho contribui para mostrar novos fatores indicadores para uma boa qualidade de voz em uma rede Wireless, que são a intensidade de sinal dessa rede e o nível de obstrução apresentado pelo ambiente.

1.5 Organização da dissertação

A fim de atingir os objetivos definidos, o trabalho está organizado da seguinte maneira: o Capítulo 2, devido à importância das redes sem fio IEEE 802.11 para o tema desta dissertação, apresenta as principais características dessas redes e uma breve cronologia do surgimento dessas redes. O Capítulo 3 é dedicado a

⁷ Voz sobre WiFi, também conhecido como VoWiFi ou VoWlan, é a transmissão de voz sobre redes IEEE 802.11, a união dessas duas tecnologias fornece uma alternativa de baixo custo para as comunicações móveis.

qualidade de serviço em VoIP, fatores que influenciam nessa qualidade e transmissão de voz sobre redes IEEE 802.11. O Capítulo 4 introduz os codecs relevantes a este trabalho. No Capítulo 5 são apresentados os testes de laboratório, análise dos dados e resultados obtidos. Por fim, o Capítulo 7 traz nossas considerações finais. Encerrando com referências, anexos e apêndices.

1.6 Trabalhos futuros

Como proposta para trabalhos futuros também esta a investigação do desempenho dos codecs utilizados em ambiente outdoor, utilizando redes 802.11b, onde ocorra a ligação VoIP combinada com o tráfego de aplicações tradicionais orientadas a dados, como texto, imagem, email e FTP.

2 Introduções às redes IEEE 802.11

As redes sem fio IEEE 802.11, que também são conhecidas como redes Wi-Fi, foram uma das grandes novidades tecnológicas dos últimos anos. Atualmente, IEEE 802.11 é o padrão de *fato* em conectividade sem fio para redes locais. Como prova desse sucesso pode-se citar o crescente número de *Hot Spots* e o fato de a maioria dos computadores portáteis novos já saírem de fábrica equipados com interfaces IEEE 802.11. Os *Hot Spots*, presentes nos centros urbanos e principalmente em locais públicos de lazer e de serviços, estão mudando o perfil de uso da Internet e — inclusive — dos usuários de computadores.

Desse modo, motivado pela crescente importância das redes IEEE 802.11 e considerando a recorrente referência a essa tecnologia no decorrer deste trabalho, este capítulo apresenta as principais características dessas redes, faz uma revisão cronológica do seu desenvolvimento e descreve seus principais mecanismos adaptativos e parâmetros de configuração. Além disso, para concluir, traçamos nossas considerações sobre o futuro dessas redes. Na Figura 1, é possível observar a estrutura das redes sem fio.

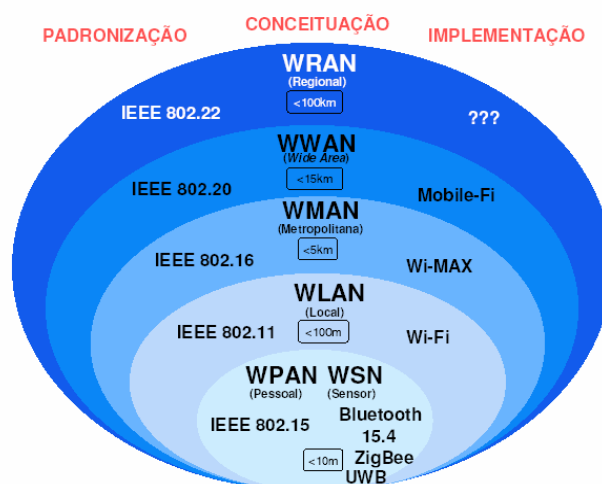


Figura 1. Evolução das redes sem fio
FONTE: IEEE Working Group

Este trabalho está concentrado na WLAN⁸, mais precisamente utilizando 802.11g, que foi aprovado em Junho de 2003 tendo alto desempenho na faixa de 2.4 GHz, atingindo até 54 Mbps e compatível com o 802.11b.

2.1 Cronologia de desenvolvimento do padrão IEEE 802.11

Antes de apresentar o padrão IEEE 802.11, vejamos uma breve cronologia do seu desenvolvimento: (IEE99)

- 1989: o Federal Communications Commission (FCC), órgão americano responsável pela regulamentação do uso do espectro de freqüências, autorizou o uso de três faixas de freqüências;
- 1990: o Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) instaurou um comitê para definição de um padrão para conectividade sem fio;
- 1997: após sete anos de pesquisa e desenvolvimento, o comitê de padronização da IEEE aprovou o padrão IEEE 802.11; nessa versão inicial, as taxas de transmissão nominal eram 1 e 2 Mbps;
- 1999: foram aprovados os padrões IEEE 802.11b e 802.11a, que usam as freqüências de 2,4 e 5 MHz e são capazes de atingir taxas nominais de transmissão de 11 e 54Mbps, respectivamente.

⁸ WLANs são redes que permitem o estabelecimento de conexões sem fio em distâncias de algumas centenas de metros. Através destas conexões sem fio é possível acessar Redes Locais (Intranet) e Internet, bastando que estejam em algum local que disponha de ponto de acesso (Access Point).

O padrão 802.11b, apesar de atingir taxas de transmissão menores, ganhou fatias maiores de mercado do que 802.11a; as razões para isso foram basicamente duas: primeiro, as interfaces 802.11b eram mais baratas do que as 802.11a e, segundo, as implementações de 802.11b foram lançadas no mercado antes do que as implementações de 802.11a. Além disso, nesse ano foi criada a Wireless Ethernet Compatibility Alliance (WECA), que se organizou com o objetivo de garantir a interoperabilidade entre dispositivos de diferentes fabricantes;

- 2000: surgiram os primeiros *hot spots*, que são áreas públicas onde é possível acessar a Internet por meio das redes IEEE 802.11. A WECA lançou o selo Wireless Fidelity (Wi-Fi) para atestar a aderência dos produtos às especificações; mais tarde o termo Wi-Fi tornou-se um sinônimo de uso abrangente das tecnologias IEEE 802.11;

- 2001: a companhia americana de cafeterias Starbucks implementou hot spots em sua rede de lojas. Os pesquisadores Scott Fluhrer, Itsik Mantin e Adi Shamir demonstraram que o protocolo de segurança *Wired Equivalent Privacy* (WEP)⁹ é inseguro;

- 2002: a WECA passou a se chamar Wi-Fi Alliance (WFA) e lançou o protocolo Wi-Fi Protected Access (WPA)¹⁰ em substituição ao protocolo WEP;

- 2003: o comitê de padronização da IEEE aprovou o padrão IEEE 802.11g que, assim como 802.11b, trabalha na faixa de 2,4 MHz, mas alcança até 54 Mbps de taxa nominal de transmissão. Aprovou também, sob a sigla IEEE 802.11f, a recomendação de práticas para implementação de *handoff*;

- 2004: a especificação 802.11i aumentou consideravelmente a segurança, definindo melhores procedimentos para autenticação, autorização e criptografia (HM, 2005);

- 2005: foi aprovada a especificação 802.11e, agregando qualidade de serviço (QoS) às redes IEEE 802.11. Foram lançados comercialmente os primeiros pontos de acesso trazendo pré-implementações da especificação IEEE 802.11e;

- 2006: surgiram as primeiras implementações do padrão 802.11n, que usa múltiplas antenas para transmissão e recepção, *Multiple-Input Multiple-Output* (MIMO), atingindo taxa nominal de transmissão de até 600 Mbps.

⁹ WEP significa Wired Equivalent Privacy, e foi introduzido na tentativa de dar segurança durante o processo de autenticação, proteção e confiabilidade na comunicação entre os dispositivos Wireless.

¹⁰ WPA (Wi-Fi Protected Access) é um protocolo de comunicação via rádio. É um protocolo WEP melhorado.

Ademais, o desenvolvimento continua. Ainda estão em pleno desenvolvimento as seguintes especificações: 802.11k, métricas para avaliação da conectividade; 802.11p, redes sem fio para ambientes veiculares (alta mobilidade); 802.11r, otimização do *handoff*; 802.11s, interconexão automática entre pontos de acesso (*Mesh Networks*); 802.11t, avaliação de desempenho de redes sem fio; 802.11u, uniformização da interconexão entre redes; 802.11v, gerenciamento de redes; e, por fim, 802.11w, cuja finalidade é aumentar a proteção dos quadros de transmissão contra interferências externas.

Além disso, estima-se que neste ano as vendas de dispositivos com interface IEEE 802.11 atinjam dezenas de milhões de unidades (ECONOMIST, 2005). Além dos computadores portáteis, as interfaces IEEE 802.11 também devem equipar telefones celulares, câmeras digitais, impressoras, aparelhos tocadores de MP3¹¹ etc. Portanto, as redes IEEE 802.11 certamente alcançarão novos nichos de mercado.

2.2 Modos de operação: infra-estruturado e *ad hoc*

Existem dois modos de operação para as redes IEEE 802.11: o modo *ad hoc* e o infra-estruturado. O modo *ad hoc* caracteriza-se pela ausência de coordenação central: as unidades móveis podem formar suas redes, associando-se livremente umas às outras. Um exemplo de utilização de IEEE 802.11 em modo *ad hoc* ocorre durante as reuniões de negócios, em que os participantes formam redes *ad hoc* entre seus computadores para disponibilizar e trocar arquivos.

Mas, apesar da aplicabilidade das redes *ad hoc*, atualmente são as redes infra-estruturadas as principais responsáveis pela grande utilização das redes IEEE 802.11. O modo infra-estruturado caracteriza-se pela presença de um nó central — chamado de ponto de acesso — para a coordenação e distribuição dos tráfegos; dessa forma, todo o tráfego de dados passa através do ponto de acesso; os *Hot Spots*, por exemplo, normalmente disponibilizam o acesso à Internet usando o modo infra-estruturado. Este trabalho utiliza o modo infra-estruturado.

¹¹ O MP3 foi um dos primeiros tipos de compressão de áudio com perdas quase imperceptíveis ao ouvido humano.

2.3 O futuro de IEEE 802.11

Tendo em vista os avanços tecnológicos e as tendências de uso de redes de computadores, são apresentados alguns fatores que apontam para a crescente utilização das redes 802.11:

- redução gradual dos custos e maior aderência dos produtos aos padrões;
- disponibilização de interfaces para programação e controle dos dispositivos (NDIS) e transferência de parte das funcionalidades da camada MAC, hoje geralmente implementadas em hardware, para as camadas de software (*Native Wi-Fi*);
- crescimento do número de *hot spots* gratuitos em locais públicos e também em locais onde a circulação de pessoas é restrita, tais como escritórios e condomínios;
- lançamento de dispositivos móveis — principalmente telefones celulares e computadores de mão — com capacidade para multiconexão transparente, o que significa capacidade de estar conectado sempre utilizando a melhor conexão dentre as diferentes tecnologias de rede disponíveis;
- lançamento de novos serviços com forte apelo de utilização sobre redes sem fio, tais como: serviços baseados em localização (LBS), VoIP, vídeo email, TV digital e interativa com canais de programação independente, dinheiro eletrônico etc.

Além disso, podemos contar com o avanço tecnológico das redes IEEE 802.11. Segundo os comitês de especificação da IEEE, os padrões que ainda estão em desenvolvimento estarão todos finalizados até 2008. Já é possível contar com redes cuja capacidade nominal de transmissões é de 600 Mbps.

3 QUALIDADE DE SERVIÇO EM VOIP

O propósito deste capítulo é abordar a tecnologia de Voz sobre IP e descrever os principais fatores de influência sobre a percepção da qualidade de voz pelo usuário final, tais como, eco, perda de pacotes, *jitter*, e atraso fim-a-fim. Também será apresentada uma visão geral dos principais *codecs* de voz e dos métodos para análise qualitativa e quantitativa para obtermos a clareza do som durante a comunicação.

3.1 Voz sobre redes IEEE 802.11

Na última década, Voz sobre IP (VoIP) deixou de ser uma tecnologia usada apenas em determinados nichos de mercado para tornar-se uma tecnologia à disposição da grande massa de usuários finais. Empresas como Vonage, AT&T e Skype já oferecem serviços baseados em VoIP para milhões de clientes ao redor do mundo. Durante esse mesmo período, em paralelo a popularização de VoIP, a utilização das redes locais sem fio baseadas no padrão IEEE 802.11 (Wi-Fi) cresceu gradualmente e este tornou-se o padrão de fato para redes locais sem fio. A cada dia, seja na cafeteira ou no centro de compras, essas redes estão cada vez mais presentes no nosso cotidiano. Desse modo, apesar das redes IEEE 802.11 ainda não oferecerem suporte adequado as aplicações de tempo real, seu relativo baixo custo e sua ampla utilização fizeram de IEEE 802.11 a alternativa natural para se agregar mobilidade às aplicações de VoIP.

Voz sobre Wi-Fi, também conhecido como VoWiFi ou VoWLAN¹², atraiu o interesse da comunidade acadêmica e da indústria, principalmente por fornecer uma alternativa de baixo custo para comunicações móveis. Tanto a academia quanto a indústria propuseram extensões as especificações originais de IEEE 802.11, com o intuito de melhorar o seu desempenho e adequá-lo aos requisitos das aplicações de tempo real; algumas soluções proprietárias de hardware já foram inclusive implementadas, como os produtos advindos da parceria entre Linksys e Vonage.

¹² *Voice over Wireless LAN* é o uso de uma rede sem fio com a finalidade da conversação por voz. Em outras palavras, VoIP sobre uma rede sem fio. VoWLAN pode ser implementado sobre qualquer dispositivo que acesse a Internet.

No entanto, apesar do uso de soluções proprietárias permitirem a criação de soluções interessantes, neste trabalho estamos particularmente interessados em investigar a utilização de VoWiFi que se faz possível usando-se apenas a tecnologia atualmente disponível, ou seja, com base nos padrões consolidados. Ou seja, queremos saber, dados os Cenários atuais, quais são os principais problemas que afetam negativamente as sessões de comunicação de voz sobre IEEE 802.11 e como esses problemas limitam o uso de VoWiFi. Com esse objetivo, este capítulo apresenta um resumo desses problemas e, além disso, propõe Cenários — limitados, mas importantes — nos quais VoWiFi poderia ser implementado usando-se as soluções de rede sem fio atualmente disponíveis. Antes de prosseguir, cabe dizer que este trabalho concentra-se no uso de IEEE 802.11 no último salto de acesso à Internet. Mais especificamente, concentram-se no comportamento dos pacotes de voz sobre redes IEEE 802.11 infra-estruturadas. Os problemas não diretamente relacionados à entrega de pacotes, tais como as questões de consumo de energia e de interconexão com a rede pública de telefonia, não fazem parte do escopo de nossa investigação.

3.2 Processo de transmissão de voz comunicação

O advento e popularização da *Internet* nos meados da década de 90 e início do século XXI, e o constante aumento da taxa de transmissão e banda, contribuíram para o desenvolvimento de técnicas de empacotamento e transmissão de amostras de voz sobre rede IP e mecanismos de sinalização para o estabelecimento de chamadas telefônicas nessas redes, a tecnologia VoIP (COLCHER, 2005).

O processo para comunicação de voz através de pacotes IP requer que o sinal analógico seja convertido para um sinal digital. De forma simplificada, Colcher e outros (2005) cotam 3 etapas seqüenciais nesse processo:

- Amostragem: Amostras são capturadas em pequenos intervalos de tempo. O intervalo entre as amostras é determinado por um pulso de clock e a freqüência deste *clock* é chamada de taxa de amostragem. O resultado deste

processo de amostragem no tempo, em que são guardados valores das amplitudes das amostras, é conhecido como PAM (*Pulse Amplitude Modulation*).

- Quantização: Os valores de PAM obtidos são convertidos em valores discretos na quantização. Cada amostra é aproximada a um inteiro de n bits, produzindo-se pulsos PCM (*Pulse Code Modulation*).
- Codificação: Para reduzir a banda utilizada para a transmissão da voz, utilizam-se técnicas de compressão de voz, que removem informações redundantes e eliminam o silêncio. Os dispositivos responsáveis pela compressão de voz são os *codecs* de voz.

Após as três etapas, o sinal digitalizado pode ser transportado através de pacotes IP. No processo de transporte destaca-se o protocolo RTP (*Real-Time Transport Protocol*), que é um protocolo utilizado em aplicações de tempo real, oferecendo a entrega de dados de áudio fim-a-fim. Esse protocolo faz a fragmentação desse fluxo de dados, adiciona a cada fragmento a informação de seqüência e tempo de entrega. A função de transporte do RTP é complementada por um protocolo de controle chamado RTCP (*Real-Time Transport Control Protocol*) que emite periodicamente pacotes de controle para os participantes de uma seção RTP. O mecanismo realizado por esses 2 protocolos são muito importantes, uma vez que eles podem aliviar os efeitos do *jitter* da rede, por meio de controle de *buffer* e seqüenciamento apropriados, e ter mais informações a respeito da rede para que possam adotar medidas corretivas.

O RTP é independente da camada de transporte e para que seus pacotes cheguem a um único destino (unidifusão) ou vários destinos (multidifusão) eles são encapsulados em fluxo UDP/IP (TANENBAUM, 2003).

O UDP (*User Datagram Protocol*) opera no modo sem conexão, uma característica adequada para aplicações em tempo real, porém fornece um serviço de datagrama não confiável, isto é, ele não realiza funções de controle de erros e sequencialização, isso é uma vantagem com relação ao TCP, pois este assegura a entrega de pacotes, mas torna o processo muito mais lento.

Por sua vez, os datagrama UDP são encapsulados em pacotes IP, como é mostrado na Figura 2.

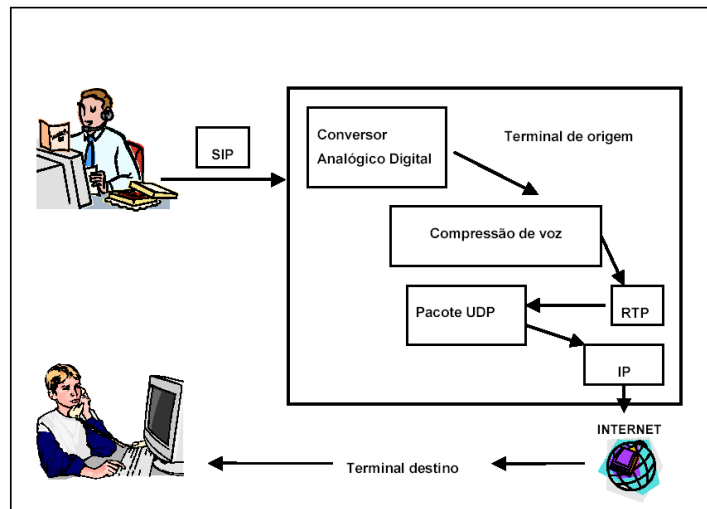


Figura 2. Fluxo básico de dados de voz em um sistema VoIP
FONTE – Benchimol; Oliveira; Moreira (2005).

3.3 Requisitos das aplicações de VoIP

Para uma comunicação utilizando-se voz sobre IP, existem alguns fatores que determinam à boa inteligibilidade da comunicação, entre a codificação e decodificação do sinal. Os fatores mais significativos que contribuem para a degradação da qualidade da voz em uma rede comutada por pacotes e que são perceptíveis aos usuários, são ilustrados na Figura 3.

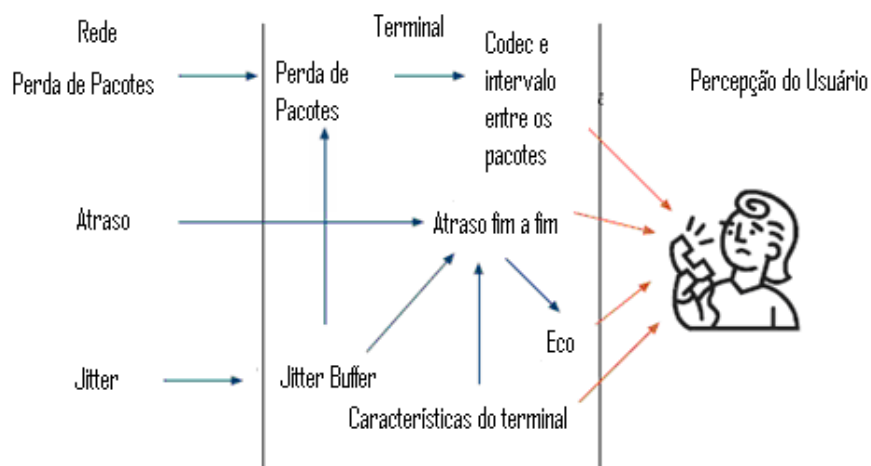


Figura 3. Fatores que influenciam a percepção da qualidade da voz
FONTE – Ulseth; Stafsnes; Moreira (2006)

Dentre esses fatores, a latência, o *jitter*, a taxa de perda de pacotes e a vazão estão relacionadas diretamente com a rede de comunicação.

3.3.1 Latência

A latência, também conhecida como atraso unidirecional (*one-way delay*), é a métrica crítica para as aplicações de VoIP; pois trata-se do tempo necessário para que uma mensagem de voz seja transmitida do emissor para o receptor. Se a latência é longa, a conversação é comprometida e a comunicação pode tornar-se não natural, não interativa, apresentando cortes e correções audíveis. De acordo com as recomendações da ITU-T (CHEN, 2004), a latência pode acumular até 150 ms sem que haja grandes impactos na qualidade da ligação. Porém, a partir de 150ms de latência, as conseqüências negativas começam a ser gradualmente perceptíveis. Atrasos de até 200 ms ainda são definidos na literatura como aceitáveis (CHEN, 2004).

Em redes IEEE 802.11, considerando-se apenas um salto de conexão, a latência é, normalmente, mesmo com a necessidade de retransmissões, menor do que 10ms (AGUERO, 2001). Sendo assim, a latência da conexão IEEE 802.11, que é da ordem de poucos milissegundos, é muito menor do que a latência total de uma comunicação pela Internet, que é da ordem de dezenas de milissegundos (CIS02, 2002). Ou seja, apesar de a latência ser uma métrica crítica, a latência média de IEEE 802.11 não é um problema para o uso de VoWiFi.

3.3.2 Jitter

A variação de atraso (*jitter*) é fenômeno que ocorre em virtude do atraso variável da transmissão dos pacotes de voz, que chegam ao destino de maneira distorcida, fora de uma ordem sucessiva, fora de uma cadência, ou ainda com tempos de atrasos variáveis. O *jitter* pode resultar em intervalos de silêncio dentro de um surto de voz, ou diminuir, ou até mesmo eliminar esses intervalos, o que pode causar a perda da inteligibilidade da informação no destino. (COLCHER, 2005) O *jitter* máximo tolerado, sem que haja comprometimento da qualidade de

voz, também é calculado segundo uma média Gaussiana, e os valores devem ficar menores que 225 ms, caso contrário resulta em uma qualidade de áudio ruim. (COLCHER, 2005)

A maioria dos terminais utiliza um buffer de *jitter* para compensar os efeitos de *jitter*, segurando esses pacotes na memória por um determinado tempo. Este tempo pode ser determinado pelo timestamp13 fornecido pelo protocolo RTP. (HERSENT; GURLE; PIERRE, 2002)

As perdas de pacotes podem ocorrer porque as redes baseadas no protocolo IP não garantem a entrega dos mesmos, ou por um grande atraso na entrega dos pacotes, fazendo com que a aplicação descarte os mesmos. A Figura 4 mostra o atraso da transmissão.

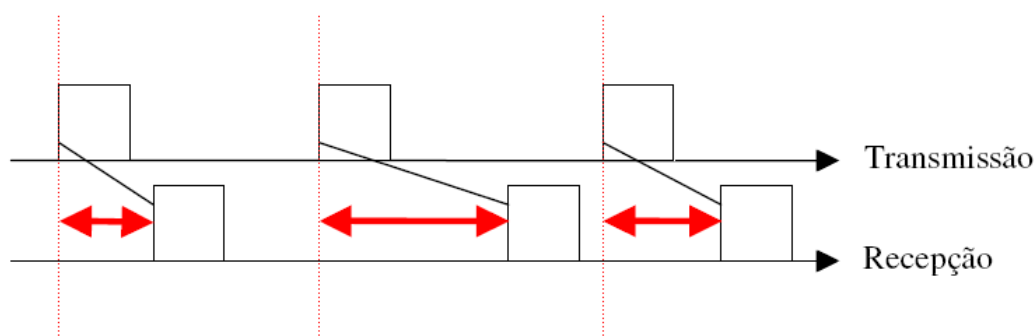


Figura 4. Exemplifica o fator *Jitter* numa rede de pacotes
FONTE: Communication Systems. John&Wiley. 1994.

3.3.3 Taxa de perda de pacotes

A taxa de perda de pacotes expressa a quantidade de pacotes não entregues. Em aplicações de VoIP, a taxa de perda de pacotes é considerada aceitável até a razão de 1% (ITU03, 2003).

No entanto, acima de 1%, os impactos na qualidade da voz normalmente tornam-se perceptíveis, surgem artefatos audíveis que dificultam a comunicação. Em redes IEEE 802.11, apesar das taxas reais de perda de pacotes serem mascaradas pelo mecanismo de ARQ (GAST, 2002), a taxa de perdas de pacotes observada é normalmente menor do que 1% (AGUERO, 2001), sendo assim aceitável para as aplicações de VoIP. Porém, se uma unidade móvel se afasta da área de cobertura de um ponto de acesso, a taxa de perdas de pacotes pode crescer abruptamente, impossibilitando a conectividade e a comunicação.

3.3.4 Vazão

A vazão é o volume de dados por segundo necessário para o tráfego dos pacotes de voz. A vazão necessária para uma conexão de VoIP é muito menor do que a capacidade nominal das redes IEEE 802.11. Uma sessão típica de voz requer aproximadamente 64 kbps, enquanto 802.11g oferece 54 Mbps. Entretanto, se um ponto de acesso é utilizado para transmitir múltiplas chamadas de voz, pode haver um problema de capacidade. Desse modo, as redes IEEE 802.11 parecem ser — com certa margem de folga — apropriadas para VoIP, pois os valores médios de latência, *jitter*, vazão e a taxa de perda de pacotes dessas redes indicam que VoWiFi deveria poder ser usado sem maiores problemas.

3.3.5 MOS

Para codificadores de voz para telefonia com baixa taxa de transmissão entre 4 e 32 kbit/s, o método de medida subjetiva mais usada para obter resultados confiáveis e reproduzíveis é a classificação por categoria absoluta (ACR) que retorna a pontuação de opinião (MOS). Para testes ACR, é pedido que ouvintes classifiquem de maneira absoluta a qualidade de amostras de voz sem compará-la com a amostra de referência. A qualidade do som ouvido é avaliada de uma maneira geral e a escala usada é a que está na Tabela 1.

Tabela 1. Escala de qualidade do som ouvido para testes de ACR

Excelente	5
Boa	4
Regular	3
Insatisfatória	2
Ruim	1

FONTE: Mobile Communications. Addison Wesley, 2000.

Este é um julgamento absoluto sem referências, mas, para garantir coerência e calibração entre testes sucessivos, algumas âncoras são necessárias. Muito freqüentemente, a unidade de referência para ruído modulado (MNRU) é usado. Esse artifício simula um ruído equivalente àquele produzido por um sistema de codificação PCM Lei-A ou Lei-u (CAMPBELL, 2001).

Resultados experimentais são exibidos por médias aritméticas na forma de MOS. A relevância do MOS deve ser determinada por análise estatística exigindo muitos experimentos – isso conduz a intervalos de confiança significativos. Normalmente, um teste ACR subjetivo exige uma média de 24 ouvintes (três grupos de oito). O teste mais simples consiste em duas sentenças: 0,5 segundo de silêncio, 2 segundos para a primeira sentença, 0,5 segundo de silêncio, 2 segundos para a segunda sentença.

Apesar de codificadores de forma de onda, os híbridos e de análise por síntese, codificadores por predição linear (LPC) e *vocoders* ainda não terem sido descritos, a Figura 5 exhibe uma visão geral de valores MOS para esses codificadores em função da taxa de transmissão de bits.

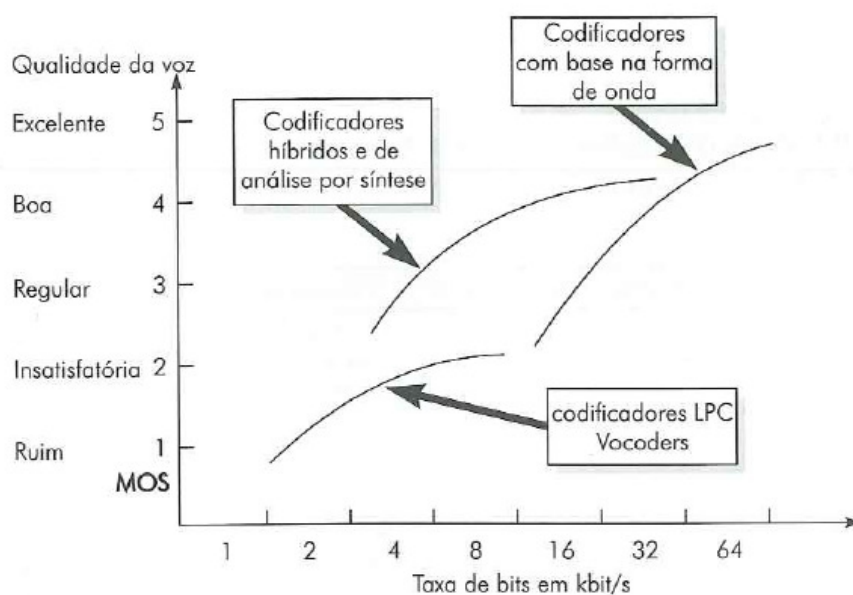


Figura 5. Valores MOS em função da taxa de transmissão de bits
FONTE – Ulseth; Stafnes; Moreira (2006)

3.3.6 Fator R

O modelo E é usado na avaliação da Qualidade de Voz (MOS), e baseia-se na idéia de que é possível somar fatores diferenciados para obter um grau de qualidade de voz em um sistema de comunicação. O resultado desse somatório usa uma variável R que representa o grau de satisfação do usuário e varia de 0 a 100. A variável R está relacionada à escala MOS (Tabela 2), entretanto existe uma degradação inerente à conversão analógico-digital, que reduz o valor de R para 93,2 e um MOS máximo de 4,41.

$$MOS_E = 1 + 0,035 * R + 7 * 10^{-6} * R * (R - 60) * (100 - R) \quad (1)$$

Sendo:

$$R = R_0 - I_s - I_d - I_{e,eff} + A$$

R_0 - nível de ruído básico;

I_s - perdas simultâneas a fala;

I_d - perdas fim – a – fim;

$I_{e,eff}$ - perdas do equipamento;

A - fator de vantagem (para telefonia = 0).

Tabela 2. Relação entre Fator R e MOS

Fator R	MOS	Satisfação
90 <=R<=100	4,3 - 4,5	Otima
80 <=R<=90	4 - 4,3	Boa
70 <=R<=80	3,6 - 4	Mediana
60 <=R<=70	3,1 - 3,6	Pobre
50 <=R<=60	2,6 - 3,1	Ruim
00 <=R<=50	1 - 2,6	Péssima

FONTE - Telefonia IP: Comunicação multimídia baseada em pacotes

4 CODIFICADORES RELEVANTES AO TRABALHO

Os codificadores têm como principal objetivo a redução de taxa de transmissão de bits (compressão de sinal), o que influencia diretamente no espaço de memória e largura de banda necessária para transmissão (MONTEIRO). Em contrapartida, têm como desvantagens o aumento do atraso e a perda da qualidade do sinal, devido ao processamento do algoritmo de codificação e decodificação, conforme mostrado na Figura 6.

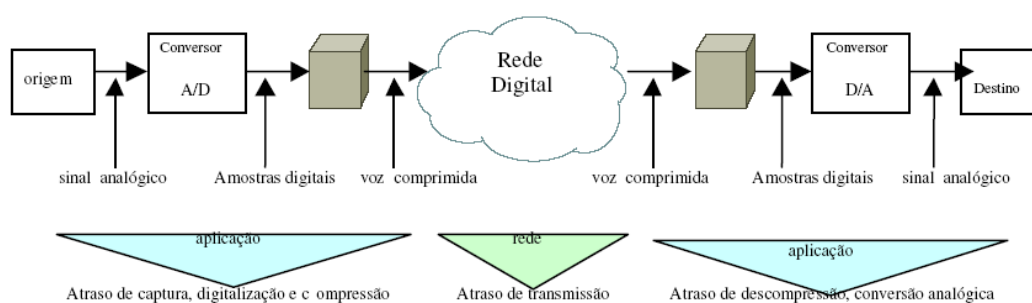


Figura 6. Atrasos na transmissão de um sinal
FONTE – Ulseth; Stafsnes; Moreira (2006)

Os *codecs* possuem características que determinam a escolha para seu uso: taxa de bits, atraso, complexidade do algoritmo, qualidade. Esta diz respeito ao nível máximo da qualidade a ser obtida pelo receptor. Nesse sentido, o PCM Linear fornece a melhor qualidade, embora utilize uma banda maior.

Existem codificadores de áudio que foram desenvolvidos especificamente para a compressão da voz humana (SCHINITZLER). Esses algoritmos exploram redundâncias e relevâncias (sinais fora de frequência produzida pela voz) encontradas nos sinais, ou até propriedades do ouvido humano como aproximações e preenchimento de seqüências incompletas. Esses codificadores, também conhecidos como codificadores híbridos, foram projetados a partir dos codificadores de forma de onda dos *vocoders*.

Os codificadores de forma de onda possuem a vantagem de apresentarem melhor qualidade, embora utilizem uma maior largura de banda (64 kbps). Um exemplo é o G711 (ITU-G711).

Os *vocoders* são codificadores que tentam modelar a forma de onda de voz, comparando o sinal original com valores já gravados no seu sistema. Tentam

imitar o sistema de reprodução de voz humana. Esses codificadores usam pequena largura de banda, em torno de 4,8 kbps, mas possuem baixa qualidade na reprodução da voz, que resulta numa voz sintética (robótica).

Neste capítulo serão apresentadas as técnicas de compressão, informações gerais e as características das Recomendações G711, G729, G.723.1 e GSM. Por fim, é apresentado um quadro resumo comparando as taxas de transmissão, atrasos e necessidades de recursos da G.723.1, G.729, G.729 e GSM.

4.1 PER e BER

Diferentemente dos serviços de transferência de arquivo onde é necessário que 100% dos pacotes sejam recebidos com integridade, na comunicação de voz utilizando VoIP é aceitável um certo PER (Packet Error Rate).

4.2 G.711

Dados Gerais (ITU-G711)

Data de Aprovação: 1972

Consumo de Banda: 64 kbps

Tipo de Codificação: PCM

Escopo: Não existe um escopo preciso definido pela norma, mas foi concebida como uma forma de digitalização do sinal de voz para ser tratado de maneira mais eficiente pelos sistemas digitais de comunicação.

Atraso

Como são realizadas 8.000 amostras do sinal analógico por segundo, o atraso de algoritmo para cada informação de voz digital (um octeto) é de 0,125 ms. Na prática, um pacote com voz no padrão G.711 contém mais de um octeto de informação.

Princípio de Codificação

Em um processo de amostragem, um sinal de voz contínuo no tempo é transformado em um sinal discreto no tempo. Para tanto, toma-se amostras do

sinal a intervalos periódicos. Para que o sinal original possa ser recuperado, a partir do sinal amostrado, é preciso que a frequência de amostragem obedeça ao critério de *Nyquist*, isto é, seja maior ou igual ao dobro da maior frequência formadora do sinal. Desta forma, para um sinal com máxima frequência de F_{max} , a frequência de amostragem deve ser $f_a = 2 \times F_{max}$.

Para aplicações em sistemas telefônicos em PCM, a frequência de amostragem adotada é de 8.000 amostras da amplitude do sinal por segundo. Depois de feitas as amostragens, estas são quantizadas em 256 níveis, sendo utilizados 8 bits para cada representação. Este tipo de codificação necessita de um canal com banda de 64 kbps para transmissão do sinal digitalizado, já que são geradas 8.000 amostras de 8 bits por segundo.

O procedimento de quantização nada mais é do que a atribuição de um valor discreto contável aos níveis de amplitude do sinal contínuo amostrado. Esse processo gera um erro ou ruído de quantização que consiste na diferença entre o sinal na entrada do quantizador e o sinal discreto na saída.

4.3 G.729

Dados Gerais (ITU-G729, SCHRÖDER)

Data de Aprovação: 19 de março de 1996

Consumo de Banda: 8 kbps

Tipo de Codificação: CS-ACELP

Escopo: Sua concepção foi de codificar um sinal de voz com qualidade total em 8 kbps, para ser usado em primeiro lugar por aplicações com comunicação sem fio e em segundo lugar por redes com fio que necessitem compressão da banda usada pelo sinal codificado, tais como circuitos transoceânicos.

Atraso

Esta Recomendação codifica a fala e outros sinais de áudio em quadros de 10 ms cada. Adicionalmente, temos um tempo de *look-ahead* de 5 ms, que é a habilidade de um processo prever quais eventos serão gerados no futuro, resultando em 15 ms o tempo de atraso do algoritmo.

Princípio de Codificação

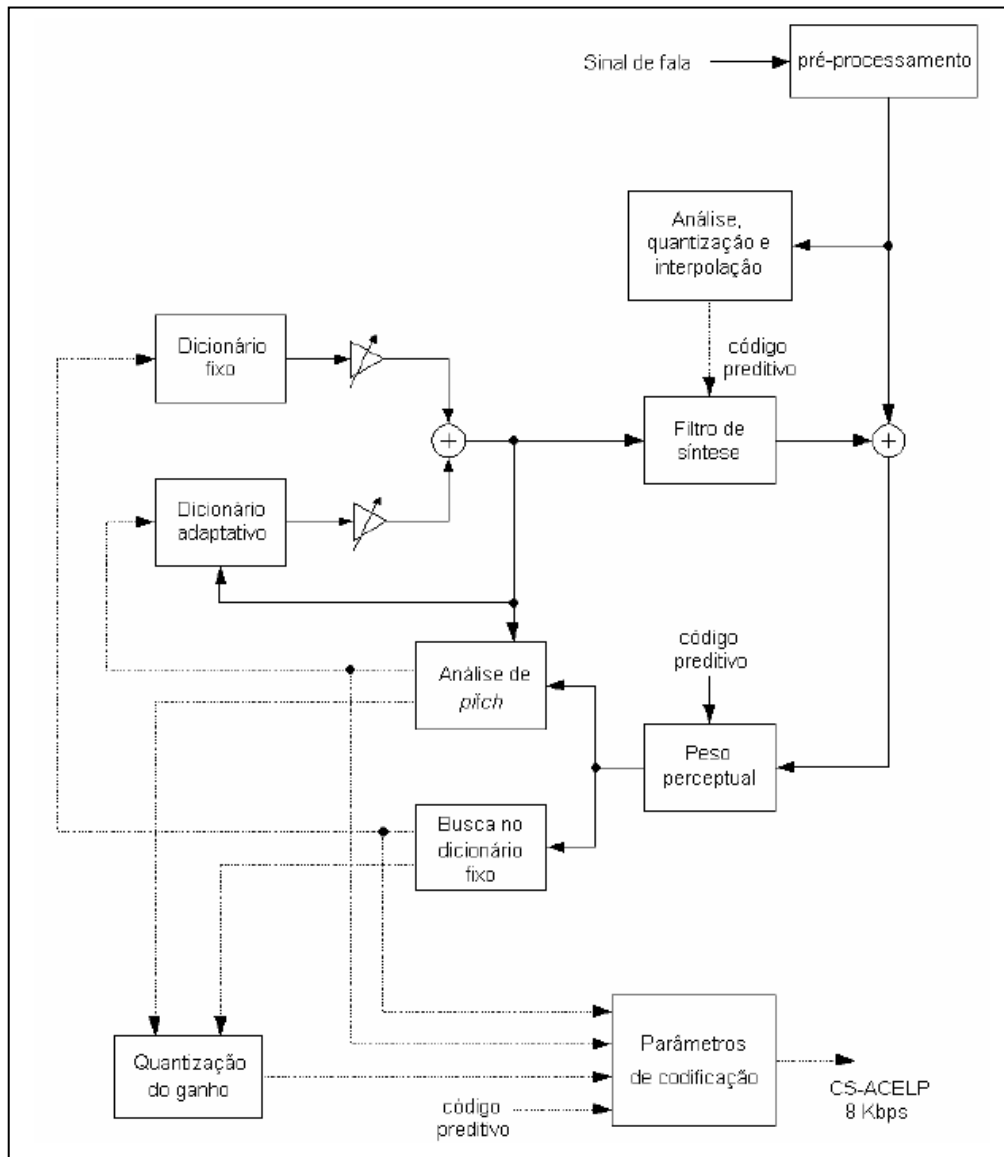


Figura 7. Diagrama de blocos simplificado da codificação CS-ACELP
FONTE: ITU-G729

Este codificador foi desenhado para operar com um sinal digital obtido de um sinal analógico resultante de filtragem, com largura de banda empregada em sistemas telefônicos, conforme Recomendação G712. Após 8.000 amostragens por segundo, o sinal é convertido em um PCM linear de 16 bits, servindo de entrada para o codificador. A saída do decodificador é convertida para analógica de forma similar. Outra forma de entrada e saída é descrita pela Recomendação G711 para dados PCM a 64 kbps, sendo convertida em PCM linear de 16 bits antes da

codificação e de PCM linear de 16 bits para o formato apropriado depois da decodificação.

Este codificador é baseado no modelo de codificação CELP, isto é, codificação por excitação linear positiva, base da Recomendação G728. Opera com quadros de 10 ms, correspondentes a 80 amostras de 8.000 do PCM. Para cada um dos quadros, o sinal de voz é analisado para retirada dos parâmetros do modelo CELP (ganho, índices de dicionários fixo e adaptativo e coeficientes de filtro). Esses parâmetros são codificados e transmitidos ao meio, num total de 80 bits por cada quadro amostrado (Figura 7). (ITU-G729)

Os coeficientes utilizados por seus filtros são gerados através do método de autocorrelação com janelas de observação de 30 ms. A cada 80 amostragens (10 ms) os coeficientes são computados e é feito o deslizamento da janela. Dessa forma, a análise desses valores leva em conta as 120 amostras dos quadros passados, as 80 amostras do quadro atual e 40 amostras do próximo quadro (revelando aqui os 5 ms de *look-ahead* da codificação).

4.4 G.723.1

Dados Gerais (ITU-G723)

Data de Aprovação: 19 de março de 1996

Consumo e Banda: 5,3 e 6,3 kbps

Tipos de Codificação: ACELP

Escopo: Esta Recomendação especifica uma codificação usada para compressão de voz ou sinal de áudio de um serviço multimídia para meios de muita baixa velocidade de transmissão. No projeto deste codificador, a principal aplicação considerada foi de videofone, como parte dos padrões da família da Recomendação H.324.

Atraso

Independente de qual das duas velocidades em uso, são necessários 30 ms para a formação de um quadro. Adicionalmente, temos um tempo de *look-ahead* de 7,5 ms resultando em 37,5 ms o tempo de atraso do algoritmo.

Princípio de Codificação

Na implementação desta Recomendação é obrigatório que as duas velocidades sejam disponíveis. É possível trocar de velocidade de transmissão, dentre as duas previstas, de um quadro para outro, durante uma conversão. Uma outra opção para alteração da velocidade de operação, é a utilização dos períodos de descontinuidade de transmissão nos intervalos sem fala para realizar a troca.

Este codificador foi desenhado para operar com um sinal digital obtido de um sinal analógico resultante de filtragem com largura de banda empregada em sistemas telefônicos, conforme Recomendação G.712. Após 8.000 amostragens por segundo, o sinal é convertido em um PCM linear de 16 bits, servindo de entrada para o codificador. A saída do decodificador é convertida para analógica de forma similar. Outra forma de entrada e saída é a descrita pela Recomendação G.711 para dados PCM a 64 kbps, sendo convertida em PCM linear de 16 bits antes da codificação e de PCM linear de 16 bits para o formato apropriado depois da decodificação.

É baseado no princípio de análise do sinal para síntese do resultado, tentando minimizar o peso percentual do erro do sinal. Opera com blocos de 240 amostras cada, obtidos da observação em 30 ms, das 8.000 amostras por segundo.

O processo de codificação é similar ao descrito na G.729. Nesta Recomendação uma janela *deslizante* de observação, com tamanho de 180 amostras é centrada em cada subquadro, gerando quatro conjuntos de parâmetros que serão agrupados, codificados e transmitidos. Estes parâmetros, como na Recomendação anterior, também são referências a valores de ganho, índices de dicionários e coeficientes de filtros usados no modelo.

Quando a janela está centrada no último subquadro de cada uma das 240 amostras, deverá considerar também o primeiro subquadro do próximo quadro, para a obtenção do último grupo de parâmetros. Como cada amostra leva 0,125 ms e um subquadro tem 60 amostras, o atraso de *look-ahead* é de 7,5 ms.

No caso da codificação de maior banda (MP-MLQ), o total de parâmetros transmitidos a cada quadro de 240 amostras é composto por 189 bits. Já na codificação de menor banda (ACELP) o conjunto de parâmetros soma 158 bits. Assim, $(189 \times 8000 / 240) = 6,3$ kbps e $(158 \times 8000 / 240) = 5,3$ kbps, respectivamente.

4.5 GSM

O GSM é um codec de áudio que não requer licença de uso. Ele é um codec de voz ABS que opera a uma taxa de transmissão de 13 kbit/s e foi padronizado pelo ETSI (*European Telecommunications Standardization Institute*) em 1988 para o sistema móvel celular GSM. Esse codec tem como vantagens, fácil utilização e baixo consumo de banda.

5 ANÁLISE DA QUALIDADE DE SERVIÇO EM WLAN COM OS CODECS G729, G711, G723 e GSM

Para a análise do desempenho destes *CODEC*'s foi utilizada uma bancada de emulação do Laboratório de Redes e Transmissão da PUC-Campinas. Esta bancada permite gerar em uma rede cabeada e controlada as características de uma rede sem fio.

Para tanto, o sistema é alimentado com valores de potência correspondentes à intensidade do sinal em uma rede sem fio para diferentes distâncias entre o transmissor e receptor.

A atenuação do sinal pode ser descrita por vários modelos. Em particular utilizamos o modelo de Shadowing (RAPPAPORT, 1996). O efeito de desvanecimento devido multipercurso e ao deslocamento do usuário é descrito pela distribuição de Weibull.(KATZ)

Tanto o modelo de Shadowing quanto a distribuição de Weibull tem parâmetros que dependem do ambiente e das condições de propagação do sinal. Para estes parâmetros foram utilizados os valores obtidos a partir de medidas realizadas na Praça de Alimentação da PUC-Campinas, Campus(WEIBULL). Portanto, na bancada utilizada foi emulado o ambiente da Praça de Alimentação.

A seguir estão apresentados o modelo de Shadowing, a distribuição de Weibull e a bancada de emulação.

5.1 Modelo de Shadowing

O modelo de Shadowing (RAPPAPORT, 1996), é utilizado para caracterizar a atenuação da potência do sinal em diferentes ambientes (RAPPAPORT, 1996). A potência a uma distância d pode ser determinada pela equação 2:

$$\frac{Pr(d_0)}{Pr(d)} = \left(\frac{d}{d_0} \right)^\beta \quad (2)$$

Onde β é o fator de atenuação que caracteriza o ambiente, d_0 é uma distância de referência e $P_r(d_0)$ é a potência na distância d_0 .

Em dB esta equação 3 fica

$$\frac{\overline{\text{Pr}(d)}}{\overline{\text{Pr}(d_0)}} = -10\beta \log\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (3)$$

Para completar a caracterização do ambiente é necessário considerar a variação em função de cada ponto devido a condições do ambiente. Com isto chega-se na equação do modelo de Shadowing:

$$\left[\frac{P_r(d)}{P_r(d_0)} \right]_{dB} = -10\beta \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_{dB} \quad (4)$$

Onde X_{dB} é uma variável aleatória log-normal com média zero e cujo desvio padrão depende do tipo de ambiente.

A potência $P_r(d_0)$ é a potência recebida em uma distância de referência d_0 , adotada como sendo de um metro para ambiente *indoor* (RAPPAPORT, 1996). Para ambiente *outdoor* este valor varia de 100 a 1000 metros, dependendo do raio da célula. Atualmente como as células são menores que no passado a tendência é a utilização de uma distância de referência de 100 m. A atenuação neste ponto é considerada como sendo do espaço livre, calculada pela equação (RAPPAPORT, 1996):

$$\left[P_r(d_0) \right]_{dB} = 10 \log \left[\frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi d)^2} \right] \quad (5)$$

Onde P_t é a potência transmitida, G_t e G_r são respectivamente o ganho da antena transmissora e receptora, λ é o comprimento de onda em metros, d é a distância de separação entre as antenas em metros.

A Tabela 3 apresenta o fator de atenuação β para caracterizar diversos tipos de ambientes. Com isto é possível fazer uma predição da intensidade de sinal para vários ambientes.

Tabela 3. Fator de Atenuação para ambientes

Environment		β
Outdoor	Free space	2
	Shadowed urban area	2.7 to 5
In building	Line-of-sight	1.6 to 1.8
	Obstructed	4 to 6

FONTE: Wireless Communications : Principles and practice

Outro parâmetro para identificar o ambiente seria o desvio padrão da variável aleatória log-normal. Esta variável é utilizada para prever a incerteza da intensidade de sinal para vários ambientes e é utilizado principalmente em simulação. Alguns de seus possíveis valores estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Desvio padrão da variável aleatória

Environment	α dB (dB)
Outdoor	4 to 12
Office, hard partition	7
Office, soft partition	9.6
Factory, line-of-sight	3 to 6
Factory, obstructed	6.8

FONTE: Wireless Communications : Principles and practice

Neste trabalho não foi considerada a variável aleatória log-normal, por questão de simplicidade e por não impactar na análise final, fazendo X_{db} igual a 0.

5.2 Distribuição de Weibull

A distribuição de Weibull é uma distribuição de probabilidade contínua usada em estudos de tempo de vida de equipamentos e estimativa de falhas (LAW; KELTON, 1991).

Devido a sua flexibilidade e simplicidade, sua aplicação foi estendida à representação de sistemas de comunicação sem fio.

A distribuição de Weibull apresenta dois graus de liberdade: o fator de forma (α) e o fator de escala (β) (LAW; KELTON, 1991). A equação 6 representa a distribuição de Weibull.

$$f(x) = \frac{\alpha}{\beta^{\alpha-1}} \left(\frac{x}{\beta}\right)^{\alpha-1} e^{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^{\alpha}} \quad (6)$$

A equação 7 é a função distribuição cumulativa de probabilidade derivada da equação da distribuição de Weibull.

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^{\alpha}} \quad (7)$$

As equações 6 e 7 estão relacionadas como mostra a equação 8.

$$f(x) = \frac{d}{d(x)} F(x) \quad (8)$$

Podemos observar a variação do desvio padrão de função densidade de probabilidade em relação aos valores distintos de β nos Gráficos 1 e 2.

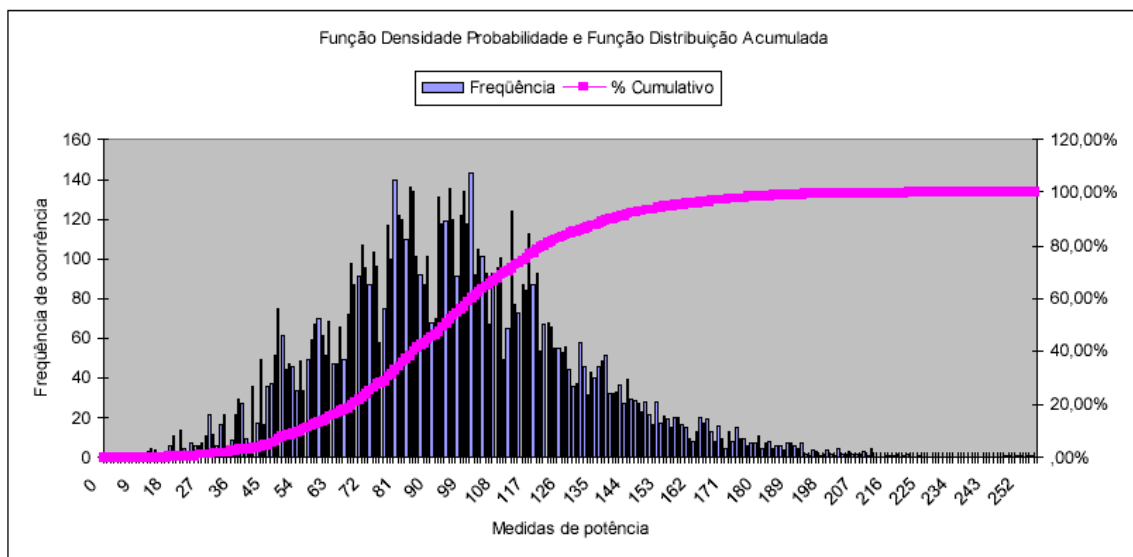


Gráfico 1. Distribuição de Weibull para $\alpha = 2$ e $\beta = 1,26$
FONTE: Bandeira, et. Al (2007)

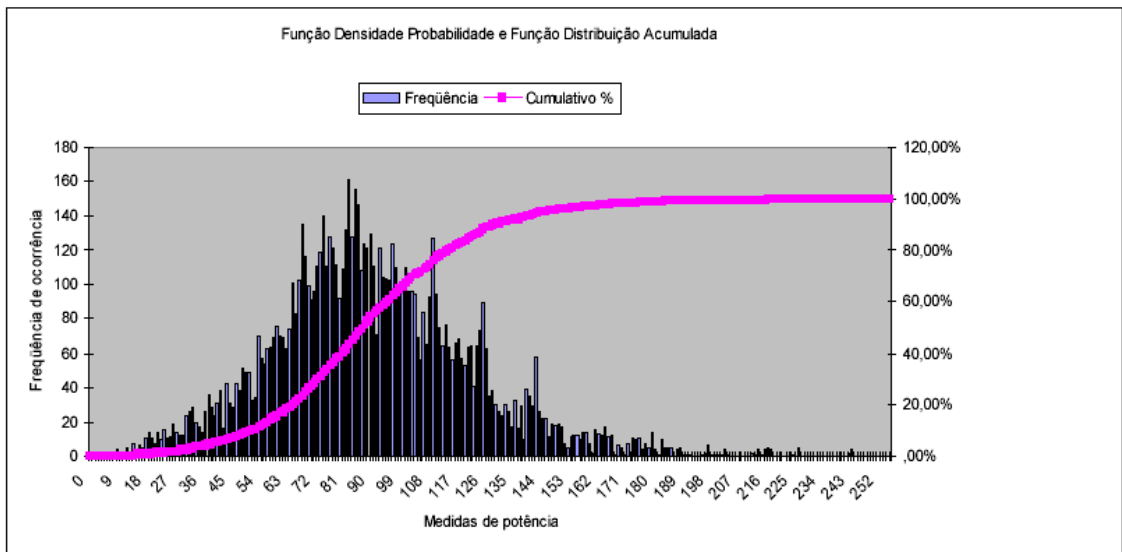


Gráfico 2. Distribuição de Weibull para $\alpha = 2$ e $\beta = 1,34$
FONTE: Bandeira, et. Al (2007)

5.3 Bancada de emulação

Para identificar problemas da transmissão de voz sobre IEEE 802.11, fizemos uso de uma bancada que emula uma rede sem fio em um sistema cabeado. Esta bancada está apresentada na figura 8.

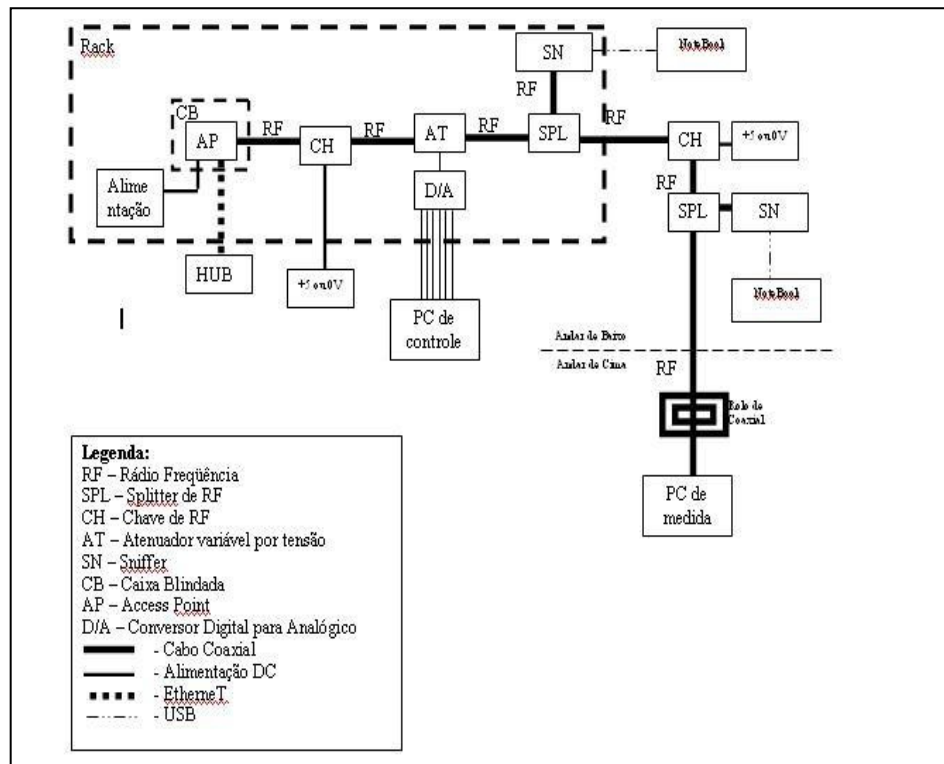


Figura 8. Bancada de testes
FONTE: Goes; Branquinho; Reggiani (2007)

O AP conectado no HUB fica confinado em uma caixa blindada e transmite um sinal através de um cabo coaxial. Este sinal é recebido por um Atenuador (AT) que atua no envelope da portadora de tal forma a emular os fenômenos de propagação através da geração, pelo PC de controle, de comandos para o controle. Para gerenciar este atenuador foi montado um circuito de controle (bloco de controle), que consiste em um conversor digital-analógico e um circuito que fornece um ajuste de ganho de *Off-set* do sinal envolvido conforme mostra a Figura 9.

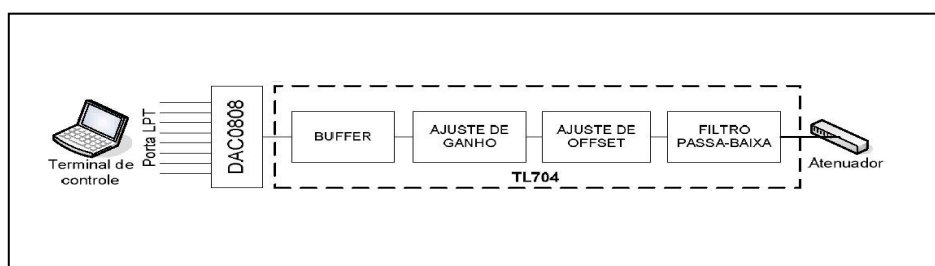


Figura 9. Bloco de Controle

FONTE: Goes; Branquinho; Reggiani (2007)

Este circuito é controlado por um software, localizado no “Terminal de Controle”. Por fim o PC de Medida através de um WNIC (*Wireless Network Interface Card*) PCMCIA recebe esse sinal controlado pelo atenuador. O software utilizado para o controle e gerenciamento do sistema foi desenvolvido com o intuito de não apenas controlar a tensão, mas sim fornecer uma forma eficaz de tratamento das informações coletadas via protocolo SNMP (*Simple Network Management Protocol*) e executar os algoritmos para geração dos efeitos propostos. Para o teste VoIP, além da bancada, foram utilizados *eyeBeam 1.5* que comunica o PC de Controle e o PC de Medida. Para capturar as informações, o *Fluke Network Protocol Education 7.0* foi essencial, também foi utilizado o *Lantraffic V.2* para a captura do *jitter* e obter a perda de pacotes. Além disso, houve um gravador de voz do PC de Controle e o PC de Medida para a comparação da qualidade de voz, com a rede estável e com a rede sofrendo degradação. Os testes foram repetidos para os codificadores de voz G729, G711, G723 e GSM.

No Anexo A está detalhado o funcionamento da bancada.

Os Cenários de testes utilizados são os que estão ilustrados na Figura 10. O receptor fica a 50, 100 e 150 metros do transmissor respectivamente, essas distâncias conseguidas através do ajuste de tensão do atenuador. Para

determinar a potência média de recepção em cada um destes Cenários foi considerado o modelo de Shadowing com valor de Beta 2. Para descrever o efeito de desvanecimento, que ocorre devido à mobilidade do receptor, foi utilizada a distribuição de Weibull com $\alpha= 2$ e $\beta= 1,26$ (BANDEIRA).

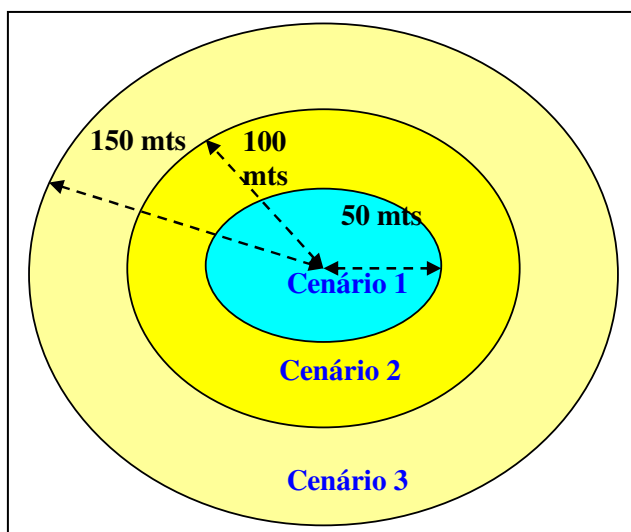


Figura 10. Cenário de testes

Para cada cenário foi realizado 3 testes de 3 minutos em todos os codec, o que resultou em 108 minutos todo o experimento.

6 RESULTADOS

Após a execução dos experimentos e obtidas às medidas do *jitter*, pode-se obter os resultados que estão apresentados nos Gráficos 3, 4 e 5 com medidas para os Cenários 1, 2 e 3 respectivamente.

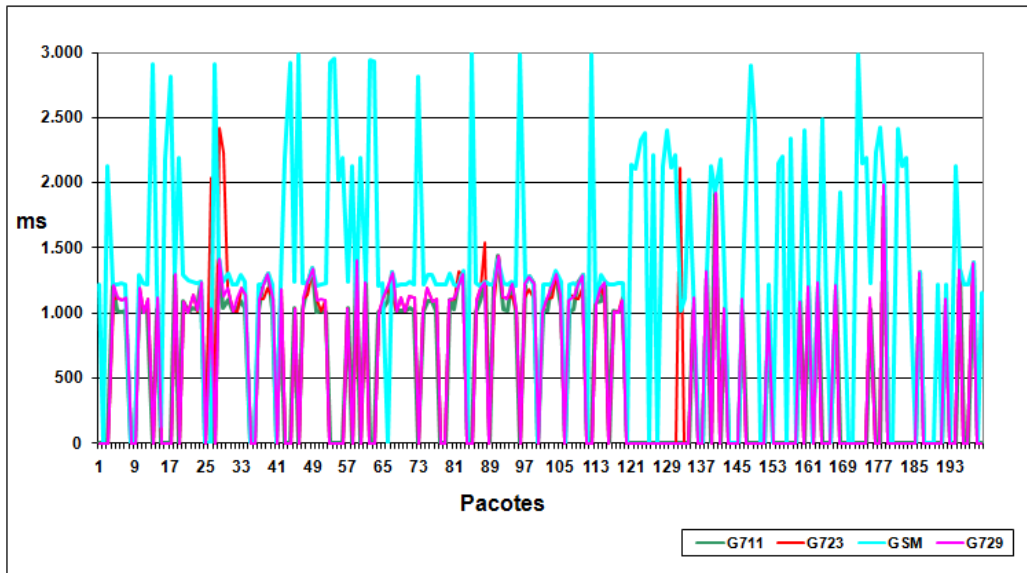


Gráfico 3. Jitter x número de pacotes transmitidos no Cenário 1

No Cenário 1, o codec GSM foi o que teve um maior *Jitter*, média de 1290 ms, enquanto que o codec G723 foi o que teve um *Jitter* menor com média de 450 ms. Os codecs G729 e G723 tiveram médias de *Jitter* praticamente iguais com 570 ms.

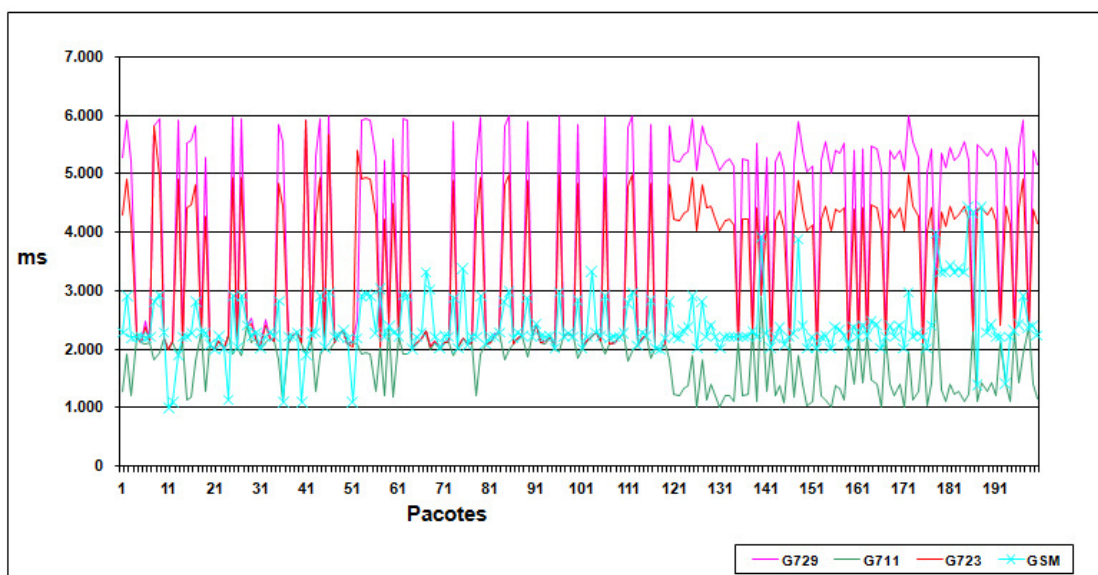


Gráfico 4. Jitter x número de pacotes transmitidos no Cenário 2

No Cenário 2, o codec G711 teve 1800 ms de média sendo o codec com menor *Jitter*. Os outros codecs tiveram em média 3800 ms.

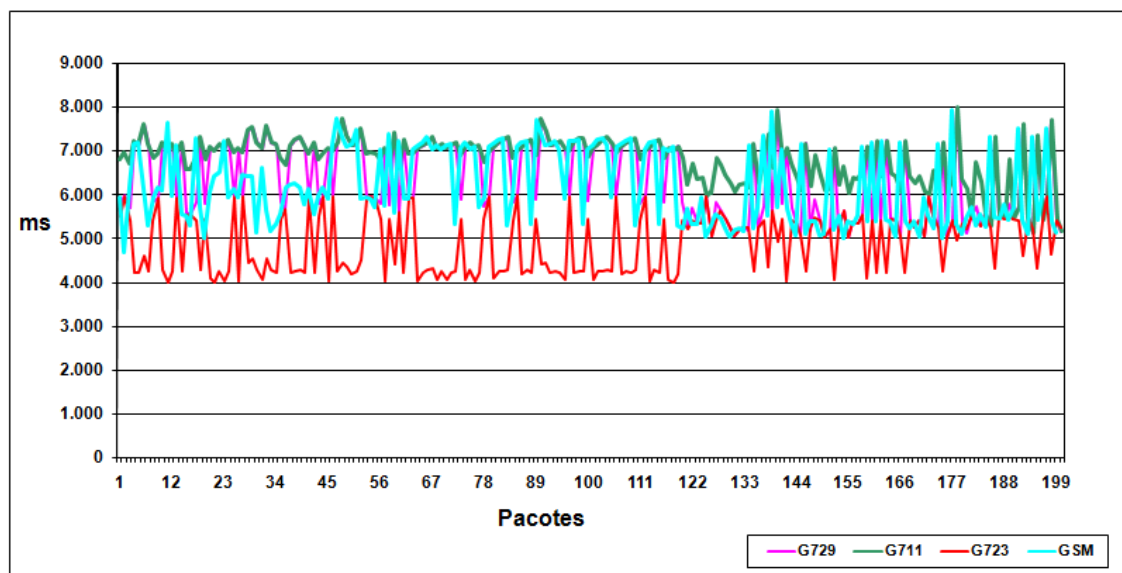


Gráfico 5. Jitter x número de pacotes transmitidos no Cenário 3

No Cenário 3, o codec G723 foi o que obteve menor valor de *Jitter* média de 4900 ms, enquanto que os codecs G729 e GSM tiveram praticamente o mesmo valor com o maior valor de *jitter* média de 6300ms o codec G711 teve 6800 ms de média.

Na Tabela 5 é possível observar um resumo das medidas de *Jitter* em ms. É possível observar que o *jitter* não é um fator relevante na definição do melhor codec.

Tabela 5. Resumo de *Jitter* em ms

Cenário	G729	G711	G723	GSM
1	569	449	585	1294
2	3903	1802	3403	2402
3	6378	6818	4980	6333

Os erros em uma rede IP são computados em termos de perda de pacotes, ou seja, através do número de pacotes perdidos. A maioria dos pacotes são perdidos devido ao congestionamento ou devido à utilização de filas de compensação da variação do atraso que sofreram.

Os resultados da perda de pacotes dos codecs G711, G729, G723 e GSM, podem ser observados nos Gráficos 6, 7 e 8 para os Cenários 1, 2 e 3 respectivamente, em média foram transmitidos 10000 pacotes num período médio de 3 minutos.

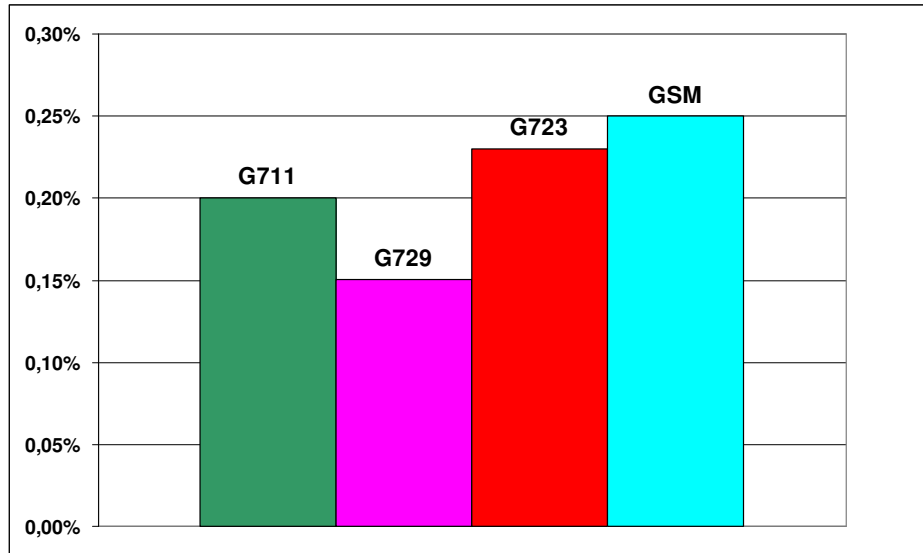


Gráfico 6. Porcentagem de pacotes perdidos no Cenário 1

No Cenário 1, o codec GSM foi o que teve um maior percentual de perda de pacotes 0,25%, seguido pelo codec G723 com 0,23%, os codecs G711 e G729 tiveram 0,2 e 0,15% respectivamente de perda de pacotes.

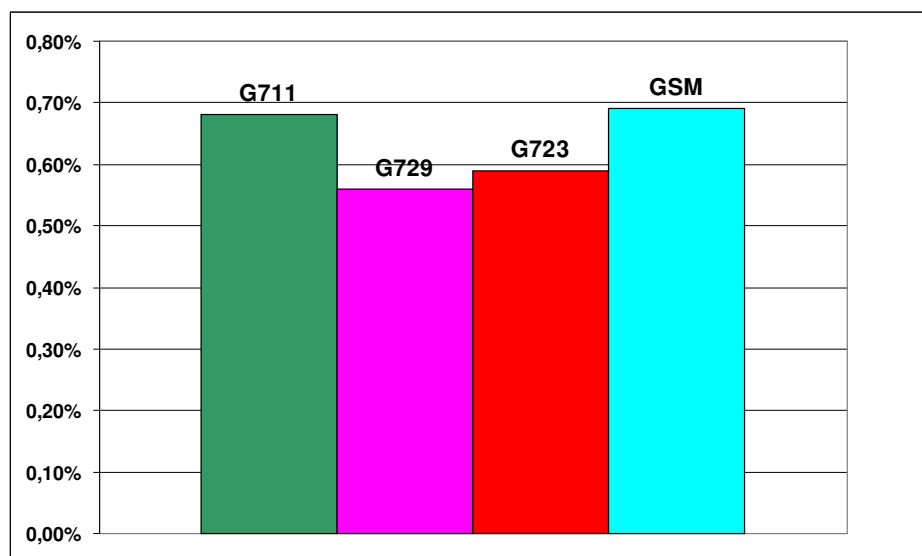


Gráfico 7. Porcentagem de pacotes perdidos no Cenário 2

No Cenário 2, o codec GSM perdeu 0,69% de pacotes, seguido pelo codec G711 com 0,68% de perdas, o G729 teve 0,56% e o G723 0,59% de perda de pacotes.

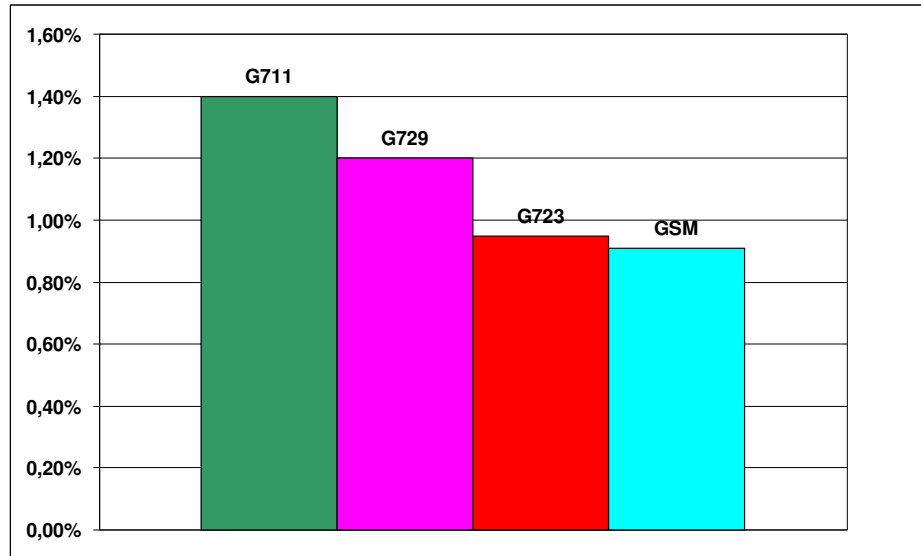


Gráfico 8. Porcentagem de pacotes perdidos no Cenário 3

No Cenário 3, o codec G711 teve 1,4% de perda de pacotes seguido pelo codec G729 com 1,2% de perda de pacotes, o GSM nesse caso teve o menor percentual com 0,91% e o G723 teve 0,95% de perda.

De uma forma geral pode-se observar que o codec G729 foi o que teve menor percentual de perda de pacotes, isso pode ser explicado, pois o payload do mesmo é menor, requerendo uma menor taxa de transmissão.

Os experimentos buscaram identificar o codec com melhor QoS, utilizando o software *Fluke* para obter os diferentes valores de fator R. Este fator caracteriza a qualidade de uma chamada VoIP nas condições presentes. A Tabela 6 apresenta os resultados do fator R nos Cenários experimentados.

Tabela 6. Fator R dos Codecs nos Cenários de teste

Cenário	G729	G711	G723	GSM
1	90	60	80	60
2	60	50	60	50
3	50	40	50	50

O aumento da distância faz com que ocorra o aumento de SNR, dessa forma a modulação do sinal é alterada garantindo um valor máximo de BER para o codec. A expressão representa o PER de determinado codec:

$$PER = 1 - (1 - BER)^N$$

Onde N é o header + *payload* do codec. O valor do header que se trafega em uma WLAN é de 106 bytes (HAYKIN). Portanto, devido à modulação, o BER irá variar dentro de uma faixa e para cada codec isso irá corresponder a valores diferentes de PER. Os valores de *payload* de cada codec, assim como a taxa de transmissão estão apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7. Taxa de transmissão e payload

Codec	Taxa (kbps)	Payload (Bytes)
G711	64	160
G723	6,3	20
G729	8	10
GSM	13	33

No Gráfico 9 é possível observar a curva de PER x BER de cada codec estudado, dada por (COOKLEV):

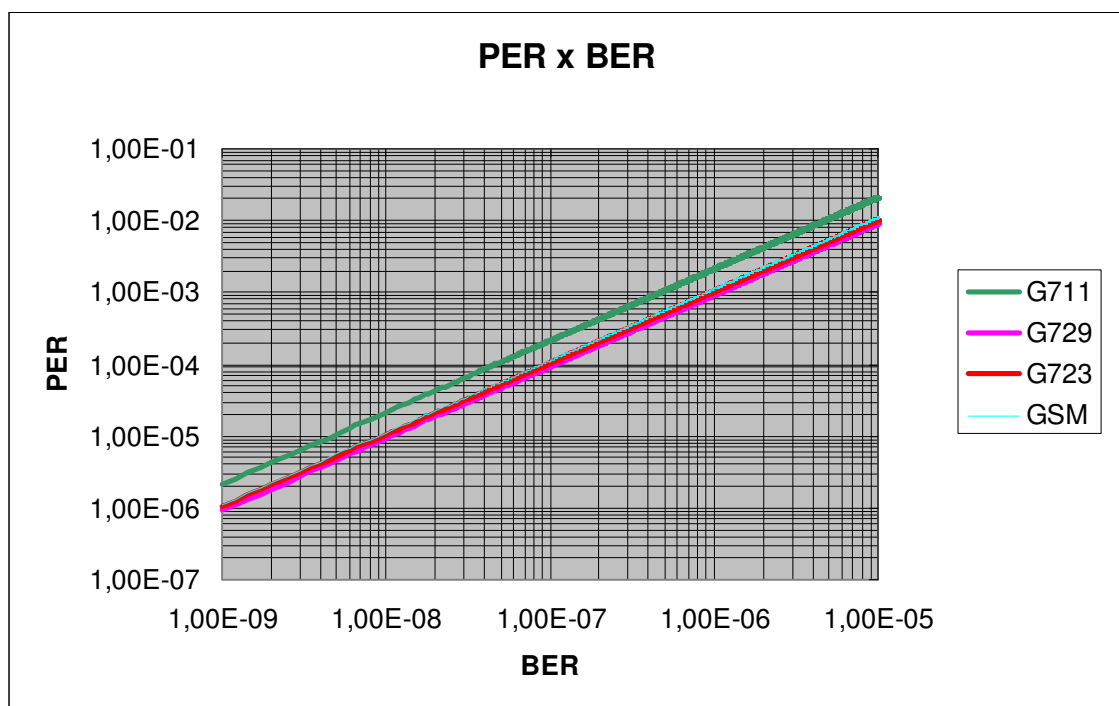


Gráfico 9. Curva PER x BER

No Gráfico 10 podemos observar fator R em função de cada Cenário. É evidente que quanto maior a distância pior será o valor de R.

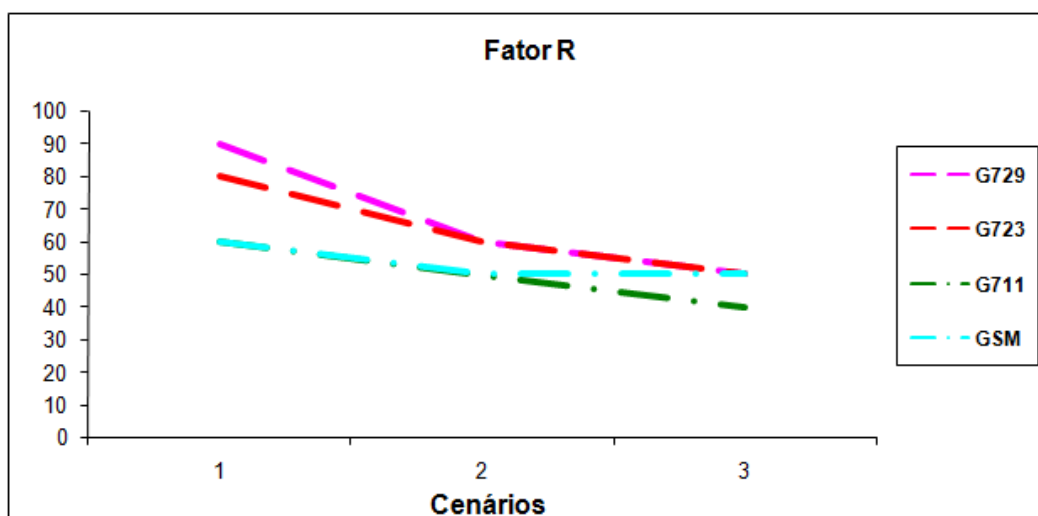


Gráfico 10. Fator R x Cenários

Dos Gráficos 9 e 10 podemos observar que:

$$PER_{G711} > PER_{GSM} > PER_{G723} > PER_{G729}$$

$$R_{G711} < R_{GSM} < R_{G723} < R_{G729}$$

Portanto vemos que os valores de PER dos codecs justificam os valores de R. O codec que tem maior PER, tem o menor R, o que significa pior desempenho.

Em uma rede cabeada, o codec G_{711} tem melhor desempenho do que o G_{729} (HAYKIN), pois tem maior *payload* e maior taxa de transmissão. Mas observamos dos resultados apresentados que o codec G_{711} tem pior desempenho que o G_{729} . Isto acontece porque estamos considerando uma rede sem fio, onde o desempenho de um serviço depende das condições do meio, que afetam o SNR. O codec G_{729} tem a menor taxa de transmissão e menor *payload* dos codecs apresentados e é o que apresenta melhor desempenho em uma rede sem fio.

No Gráficos 11 verificamos o *Jitter* em função dos Cenários. A medida do *jitter* do codec G_{729} permaneceu em média maior que todos os outros codecs.

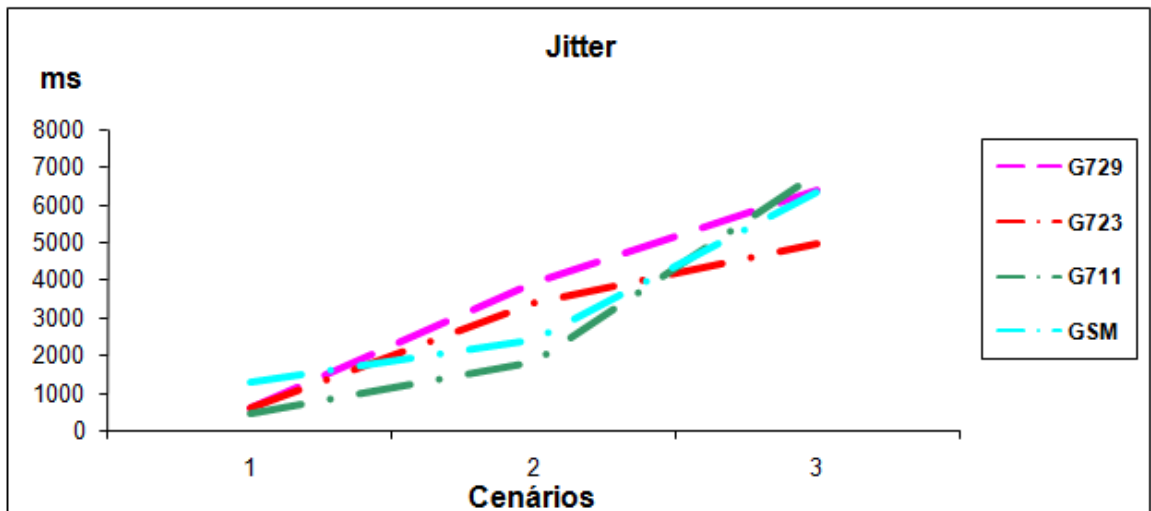


Gráfico 11. Jitter x Cenários

No Gráfico 12 verificamos a perda de pacotes em função dos Cenários. Observe-se que o codec G711 teve uma maior perda de pacotes com relação aos outros codecs.

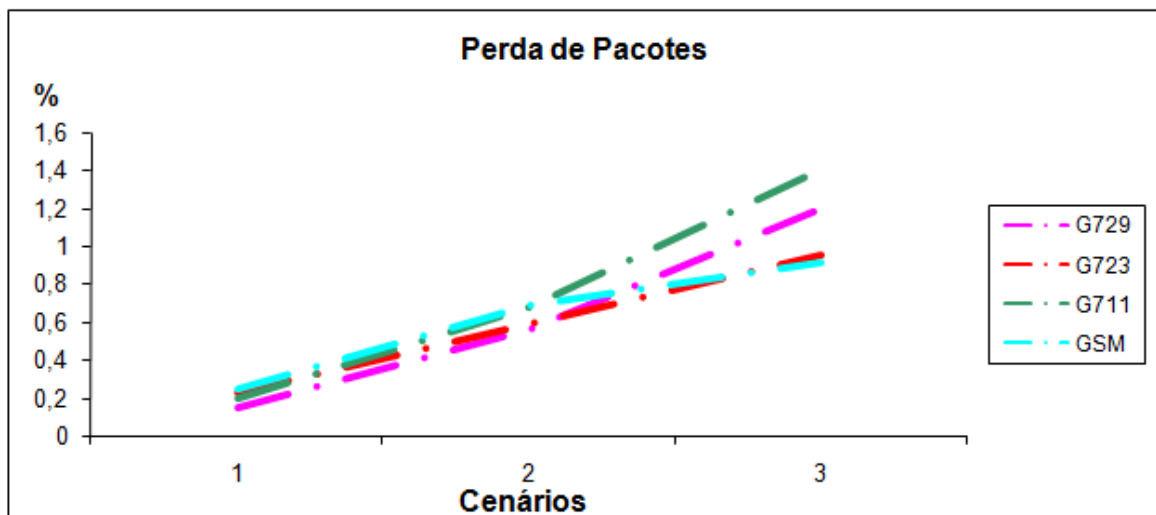


Gráfico 12. Perda de Pacotes x Cenários

Como nos Cenários estudados o G711 apresentou pior desempenho e sua perda de pacotes foi maior, isso nos leva a pensar que a perda de pacotes tem uma maior influência no desempenho dos codecs. Dessa forma o codec G729 foi o que teve melhor desempenho em uma rede sem fio.

7 CONCLUSÃO

Neste trabalho foram investigados efeitos de degradação de uma WLAN, correlacionados à qualidade de voz, ao desempenho do codec, assim como aos valores de *jitter*, perdas de pacotes e fator R. Estes resultados são importantes, pois representam o comportamento do VoWiFi, ou seja comunicação de voz utilizando redes WLAN, em Cenários reais, onde há mobilidade do usuário e vários níveis de obstrução.

Os resultados mostraram que voz sobre IP em uma rede sem fio é um grande desafio, pois requer o controle de vários fatores, e dentre eles o ambiente de rede. Verifica-se que o controle de sinal em uma rede IEEE 802.11 que apresenta um comportamento tão vulnerável aos fatores externos é uma tarefa única para cada circunstância. Os experimentos demonstraram que quando não temos controle sobre a rede, à escolha do codec pode ser um diferencial na busca de qualidade. Foi também observado que quanto maior a distância utilizada em uma rede sem fio, pior será a desempenho do VoIP independente do codec utilizado.

A emulação de um ambiente que represente os Cenários reais revelou que o codec G729 apresentou melhor qualidade de voz em todos os Cenários utilizados.

REFERÊNCIAS

AGUERO, M.G. Arranz, R. Behavior of UDP-based applications over IEEE 802.11 wireless networks. In 12th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), volume 2, pages F72–F77, San Diego, USA, September 2001.

ARRANZ, M.G. . Mahonen. Behavior of UDP-based applications over IEEE 802.11 wireless networks. In 12th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), volume 2, pages F72–F77, San Diego, USA, September 2001.

BANDEIRA, A.; BRANQUINHO, O. C; Distribuição de Weibull na Emulação de Canal em Redes Wlan para avaliação de Voip.

BEJERANO, Yigal. Efficient integration of multi-hop wireless and wired networks with QoS constraints. In 8th International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM), Atlanta, USA, September 2002.

BENCHIMOL, Bruno L. de Souza; OLIVEIRA, Davis V. Feitosa; MOREIRA, Waldir A. Voz sobre IP em redes sem fio padrão IEEE 802.11b. 2005. Dissertação (Graduação) – Ciências da Computação, Universidade da Amazônia, Belém, 2005

BLU03, Bluetooth SIG. Bluetooth specifications, 2003. <http://www.bluetooth.com>.

CAMPBELL, Fabio Kon, R. H., and Klara Nahrstedt. Using dynamic configuration to manage a scalable multimedia distribution system. *Computer Communications*, 24:105–123, 2001.

CHEN, J. H. James Bing, Implementing VoIP: a voice transmission performance progress report. *IEEE Communication Magazine*, 42(7):36–41, July 2004.

CIS02, Cisco Systems. Understanding delay in packet voice networks. White Paper, September 2002. Available at <http://www.cisco.com/warp/public/788/voip/delay-details.pdf>. Last visit in July 2005.

COLCHER, Sérgio et. Al. VOIP: voz sobre IP. Rio de Janeiro: Campus, jan. 2005. 288p

CONCEIÇÃO, Arlindo Flávio. Adaptação de fluxos contínuos UDP sobre redes IEEE 802.11b. In 5o Workshop de comunicação sem fio e computação movel (WCSF), pages 91–101, São Lourenço-MG, Brazil, October 2003.

COOKLEV, Wireless Communication Standards – A Study of IEEE 802.11, 802.15, and 802.16. Todor Cooklev. IEEE Published by Standards Information Network IEEE Press.

ECONOMIST, Revista, de 8 de dezembro de 2005

GAST, Matthew S., 802.11 Wireless Networks. The definitive guide. O'Reilly Media, 2002.

HE, Changhua and John C. Mitchell. Security analysis and improvements for IEEE 802.11i. In The 12th Annual Network and Distributed System Security Symposium (NDSS), pages 90–110, San Diego, USA, February 2005.

HEFEZ, Abramo and Maria Lucia T. Villela. Códigos Corretores de Erros. Serie de Computação e Matemática. IMPA, Rio de Janeiro, Brazil, 2002.

HERSENT, Oliver; GURLE, David; PIERRE, Jean P. Telefonía IP: comunicação multimídia baseada em pacotes. São Paulo: Addison Wesley, 2002. 451p.

IEEE04, IEEE Working Group on Broadband Wireless Access Standards. IEEE 802.16 WirelessMAN standard for wireless metropolitan area networks, June 2004. <http://grouper.ieee.org/groups/802/16>.

IEEE99, IEEE Working Group for WLAN Standards. IEEE standard for wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY), 1999. <http://grouper.ieee.org/groups/802/11>.

ITU03, International Telecommunications Union. International mobile telecommunications standard 2000 (IMT-2000), 2003. <http://www.itu.int/home/imt.html>.

ITU03, ITU-T Recommendation G.114. One-way transmission time, May 2003. ITU-G711, Rec. G.711, "General Aspects of Digital Transmission Systems Terminal Equipments - Pulse Code Modulation (PCM) of Voice Frequencies", 1972.

ITU-G723, ITU-T Rec. G.723.1, "General Aspects of Digital Transmission Systems – Dual Rate Speech Coder for Multimedia Communications Transmitting at 5.3 and 6.3 kbit/s", Mar. 1996

ITU-G728, ITU-T Rec. G.728, "General Aspects of Digital Transmission Systems; Terminal Equipments - Coding of Speech at 16 kbit/s Using Low-Delay Code Excited Linear Prediction", Sept. 1992.

ITU-G729, ITU-T Rec. G.729, "General Aspects of Digital Transmission Systems - Coding of Speech at 8 kbit/s Using Conjugate-Structure Algebraic-Code-Excited Linear-Prediction (CS-ACELP)", Mar. 1996.

JAME, J. H. Chen, and Laurie Garrison. Implementing VoIP: a voice transmission performance progress report. IEEE Communication Magazine, 42(7):36–41, July 2004.

KATZ, Randy H. Adaptation and mobility in wireless information systems. IEEE Personal Communications Magazine, 1(1):6–17, 1994.

KUROSE, J. F; ROSS, K. W. Redes de Computadores e a Internet. 3. ed. São Paulo: Pearson Education, 2003. 548p

LAW, Averil M.; KELTON, David M. Simulation modeling and analysis. [S.l.]: McGraw-Hill, 1991. p.333-335

LIANG, J. Nikolaus F"arber, and Bernd Girod. Adaptive playout scheduling and loss concealment for voice communication over IP networks. IEEE Transactions on Multimedia, 5(4):532–543, December 2003.

MENIN, Eyal. The Streaming Media Handbook. Prentice Hall Computer Books, 2002.

MONTEIRO, Rafael F, "Implementação de Transporte Robusto de Voz em Redes Baseadas em Protocolo IP", Setor de Ciências Tecnológicas, Universidade Federal de Minas Gerais, 2000.

NTT03, NTT DoCoMo. Freedom of multimedia access (FOMA), 2003. <http://foma.nttdocomo.co.jp/english>.

QUA03, Qualcomm. CDMA2000 1xEV-DO, 2003. <http://www.qualcomm.com/cdma/1xEV/>.

RAPPAPORT, Theodore S. Wireless communications : principles and practice. New Jersey: Prentice-Hall, 1996. cap. 3-4.

SCHILLER, J. Mobile Communications. Addison Wesley, 2000.

SCHINITZLER, Jürgen, "Speech Coding", Institut für Nachrichtengeräte und Datenverarbeitung, RWTH Aachen, 2001.

SCHRÖDER, G. and SHERIF, M. H., "The Road to G.729: ITU 8-kb/s Speech Coding Algorithm with Wireline Quality", IEEE Communication Magazine , Sept.1997.

TANENBAUM, Andrew S. Redes de computadores. 4. ed. Rio de Janeiro: Campus, 2003. 950p.

WALKER, J. Q. and Hicks, J. T. (2002): "The Essential Guide to VoIP Implementation and Management", NeqIQ Corporation.

HAYKIN, Simon. Communication Systems. John&Wiley. 1994.

COOKLEV, Wireless Communication Standards – A Study of IEEE 802.11, 802.15, and 802.16. Todor Cooklev. IEEE Published by Standards Information Network IEEE Press.

HARA, Bob. PETRICK, Al. 802.11 Handbook - A Designer's Companion. IEEE Press.2001

WEIBULL, Distribuição de Weibull na emulação de canal em redes Wlan para avaliação de VoIP.

ANEXOS

ANEXO A – Descrição detalhada da bancada de testes

Este documento foi elaborado pelos alunos da Engenharia Elétrica da PUC Campinas: Eduardo Coco e Karyna Silveira Cardoso e seu objetivo é descrever o funcionamento da bancada de emulação de sinais de rádio frequência, na qual a atenuação é feita através de um atenuador variável e duas chaves de RF. É apresentado o funcionamento da bancada, e todos os componentes são caracterizados com maiores detalhes.

A bancada tem como objetivo emular um ambiente de rede sem fio, utilizando um atenuador variável e duas chaves de RF. Isto possibilita fazer testes de serviços e aplicativos rodando em uma rede sem fio, porém em um ambiente cabeado com comportamento estável e controlado.

1. DESCRIÇÃO DA BANCADA

Os equipamentos estão configurados dentro de um rack, para evitar modificações na configuração, e assim alterar o mínimo possível nos resultados dos testes.

Dentro de uma caixa blindada tem-se um *access point* (AP), na qual entram três cabos.

Um está ligada em uma fonte de tensão de 110V, o outro é o cabo de rede que vai para o *hub* e o último está conectado ao circuito atenuador.

O circuito atenuador é composto por duas chaves, controladas por duas fontes de tensão que variam de 0 a 5V, ligadas em série a um atenuador variável, controlado por um computador (PC1) através de um conversor digital analógico conectado na porta paralela do PC1.

Na saída do circuito atenuador encontra-se um divisor de sinal, o qual envia o sinal de rádio frequência (RF) para um computador de medida PC2, o qual recebe o sinal através de uma placa orinoco.

Podemos melhor entender a bancada através do diagrama em blocos na FIG 1.

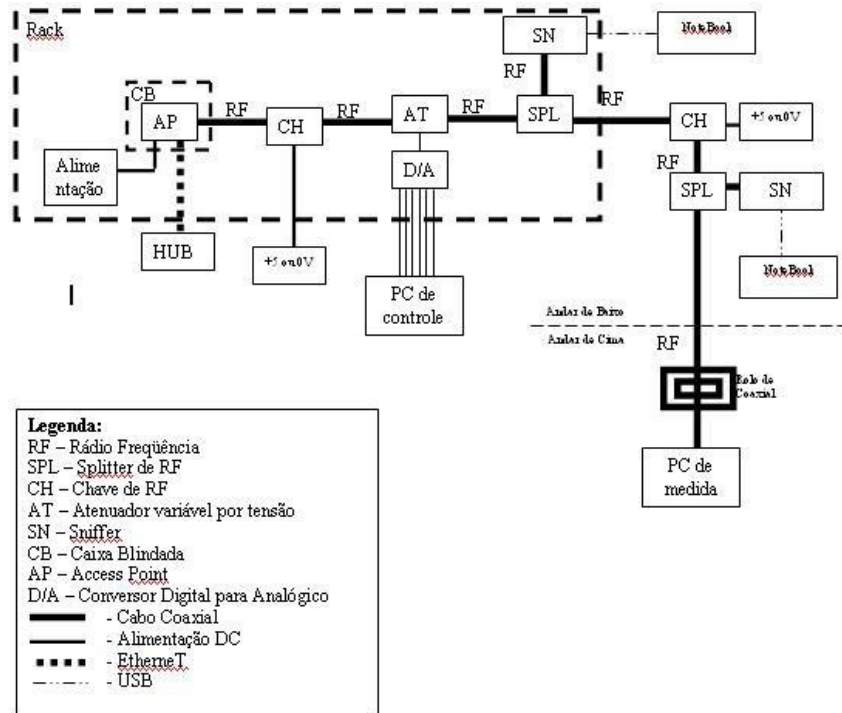


Figura 1. Diagrama em blocos da bancada de emulação

1.1 COMPONENTES DA BANCADA

1.1.1 Atenuador variável

Este atenuador variável é caracterizado como um RVA-2500, que possui um sistema equivalente como apresentado na FIG 2, abaixo.

Possui uma fonte de alimentação de 5V constante e uma controlada como variação de 0 à 16V, sendo calibrada manualmente na fonte.

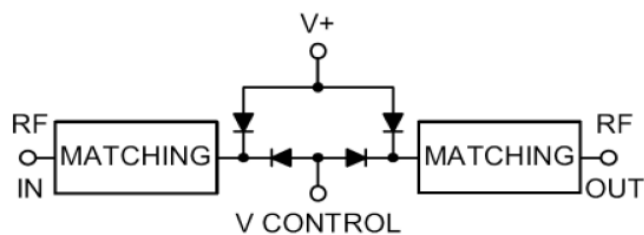


Figura 2. Circuito de atenuador variável

1.1.2 Chave RF

Têm-se na bancada duas chaves de RF, do mesmo modelo, mas possuem comportamento diferente. Caracteriza-se como uma chave ZMSW-1111 com frequência de operação de 10 a 3000 MHz e impedância de 50Ω. Possui uma única fonte de alimentação na qual variamos manualmente através de uma fonte de 0 a 5V. Temos melhor exemplificada a chave através do seu *datasheet* na FIG 3.

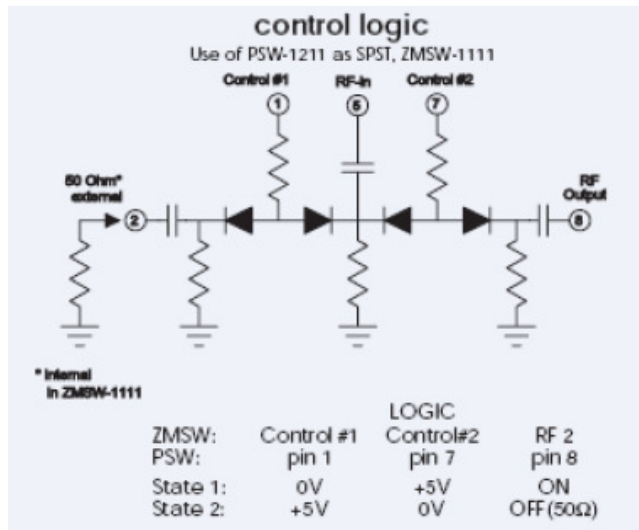


Figura 3. Circuito da chave RF

1.1.3 Access Point

O Access Point utilizado nos testes foi o AirLive WL-5460AP. Possui padrão 802.11 g e 802.11b, é compatível com a maioria dos dispositivos sem fio. Ele tem 2 portas LAN, 2MB de memória Flash e 16MB SDRAM. Possui funções de Bridge, Client e Repeater, antena dessatarrachavel.

Na FIG. 4 é possível observar suas características físicas.



Figura 4. Access Point utilizado para os testes

2. CALIBRAÇÃO

O processo de calibração consistiu em vários testes para que pudéssemos ter confiabilidade.

Primeiramente determinamos o *offset* na caixa preta (mínimo, médio e máximo). Configuramos os valores decimais de 0 a 255 no PC1 através de um software, o qual emula *Flat Fading* em Java, lê a primeira coluna de um arquivo feito no Excel e salva como *.csv. Além de carregar o arquivo indicando o tempo entre uma célula e outra que determinou também o intervalo de tempo para mudar o valor do decimal, que enviará um sinal para o conversor digital/analógico.



Figura 5. Software de controle da interface paralela

Podemos ver no multímetro o valor da tensão correspondente. Esse sinal percorrerá todo o sistema (passando pelos atenuadores que controlaram o sinal) e irá chegar até o PC2 através do cabo RJ45 que está conectado a uma placa orinoco no PC2 onde poderemos ver através do software *NetStumbler* o valor da potência do sinal, relação sinal ruído.

Assim descrevemos as curvas de comportamento de sinal RF através do *NetStumbler*, para medir a intensidade final do sinal gerado pela bancada de emulação, pois teremos mais dados do comportamento geral da bancada em relação ao atenuador variável, possibilitando uma melhor análise dos fenômenos obtidos.

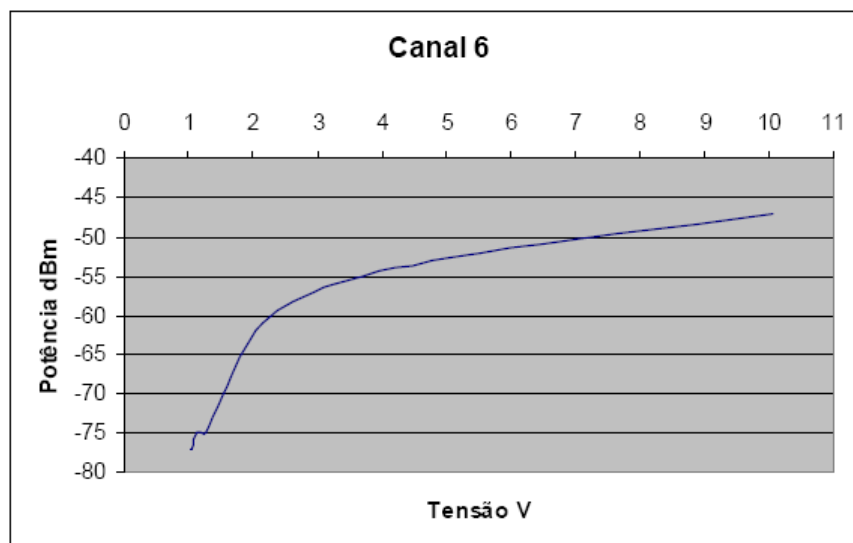


Figura 6. Curva de atenuação da bancada

2.1 Atenuador variável

É controlado por um computador (PC1) através de um conversor digital analógico conectado na porta paralela do (PC1).

Para termos dados sobre o comportamento do atenuador variável na bancada e assim podemos comparar estes dados com o gráfico especificado pelo fabricante tivemos que realizar vários testes até que a estabilidade e constância nestes valores fossem atingidas.

Foi utilizado um analisador de espectro no modo *transmission measurement*, o qual está representado na FIG 4, ligamos no atenuador variável, na entrada e saída, no mesmo sentido que o sinal da bancada passa através do atenuador. Mantivemos uma fonte de alimentação de 5V constante e uma controlada com variação de 1 à 10V, devido a regulagem da bancada, sendo calibrada manualmente na fonte.



Figura 7. Analisador de Espectro

A frequência foi variada para 2.412 GHz (canal 1), 2.437 GHz (canal 6) e para 2.462 GHz (canal 11). Percebe-se através da análise dos resultados na tabela ou mesmo através das próprias curvas dos gráficos que estão na FIG 8, 9 e 10 que, no canal 6 o atenuador variável apresentou maior atenuação que nos outros canais.

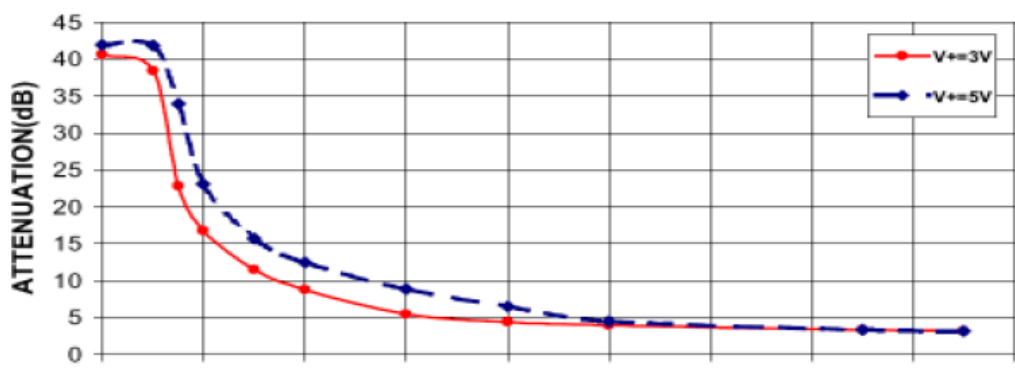


Figura 8. Resposta especificada pelo fabricante

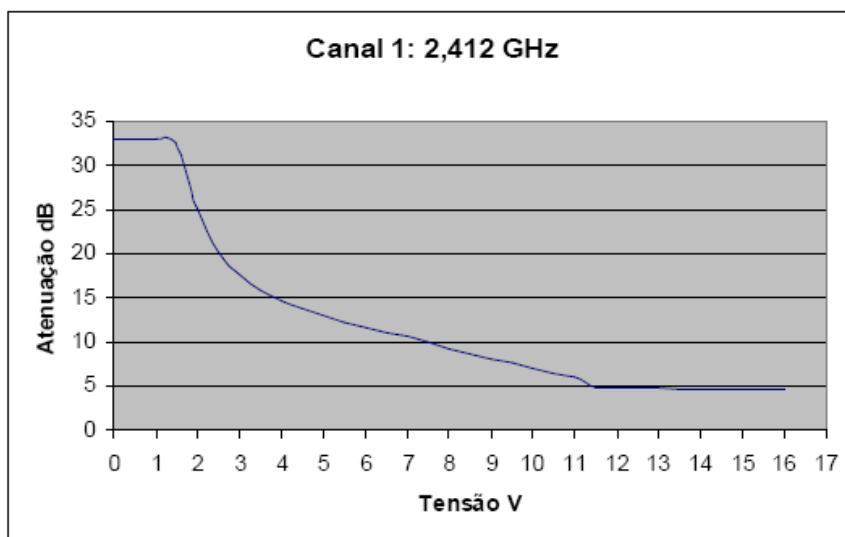


Figura 9. Curva do atenuador variável para canal 1

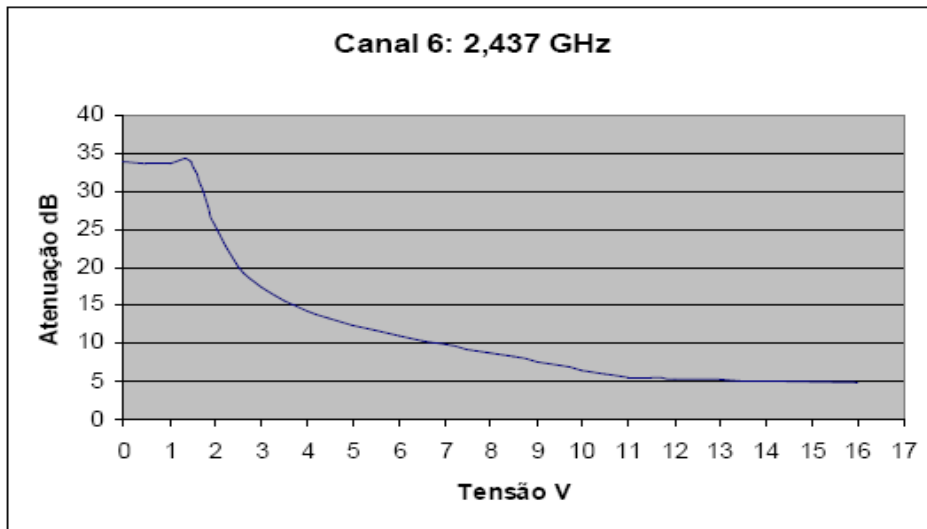


Figura 10. Curva do atenuador variável para o canal 6

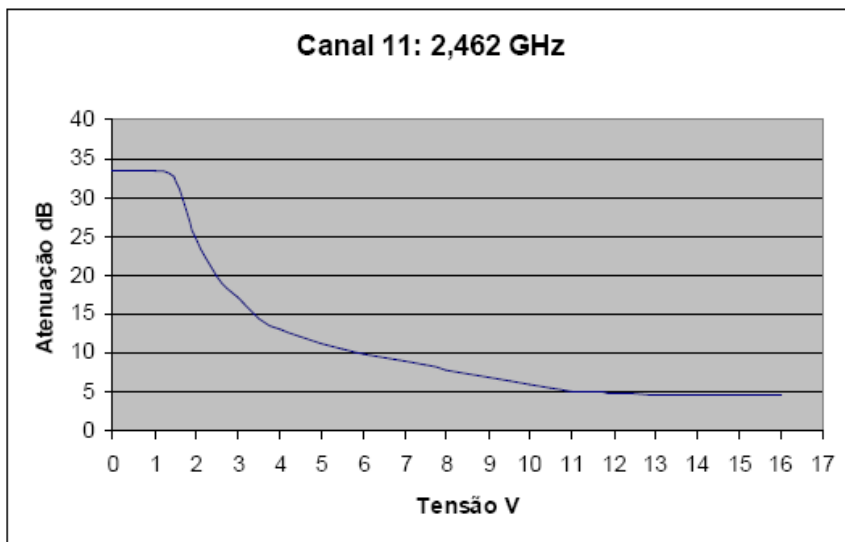


Figura 11. Curva do atenuador variável para canal 11

Ao analisarmos a resposta especificada pelo fabricante, como observado na FIG 7, percebe-se que os gráficos que obtivemos estão bem próximos do desejado, sendo que a pequena diferença entre eles deve-se ao fato de o fabricante ter considerado a frequência de 1 GHz, enquanto nossos testes foram para frequência de 2.412 à 2.462 GHz. Este fato pode justificar a pequena discrepância entre os gráficos obtidos e o especificado pelo fabricante.

2.1 Chave de RF

Para obtermos dados sobre o comportamento das chaves de RF, testamos cada uma delas, separadamente. Liga-se o analisador de espectro no modo *transmission measurement* na chave, o qual é variado o valor da frequência de 2.412 a 2.462 GHz, ou seja, para canais 1, 6 e 11, e também uma fonte de tensão a qual se varia manualmente de 0 à 5V.

Logo para a chave 1 obtiveram-se os valores conforme os gráficos na FIG 12 e 13.

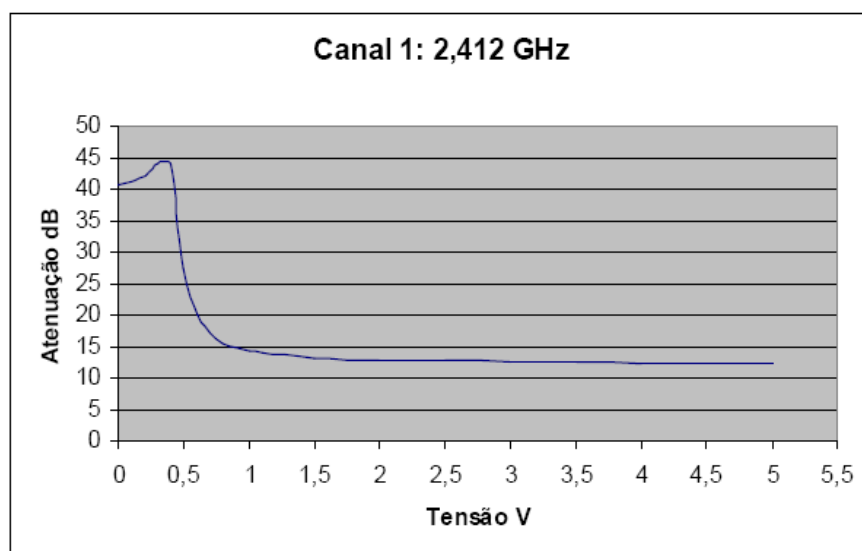


Figura 12. Atenuação da chave 1 no canal 1

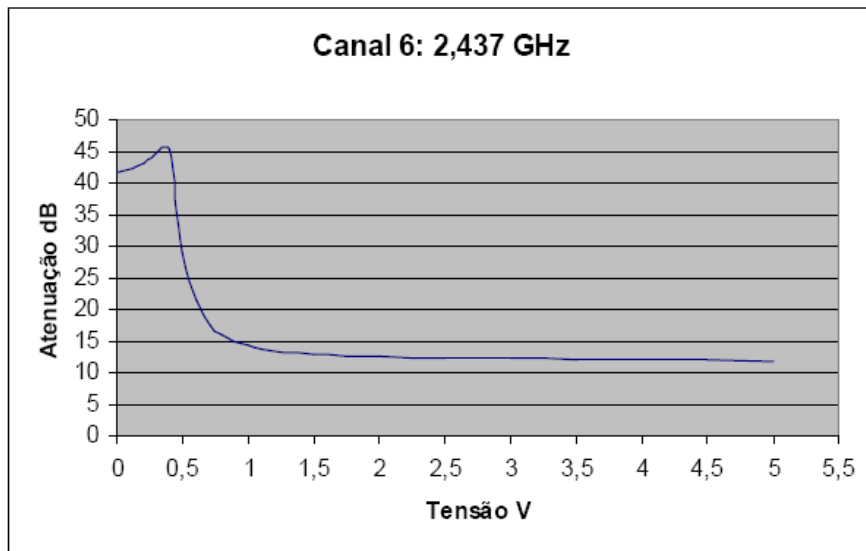


Figura 13. Atenuação da chave 1 no canal 6

Para a chave 2 obtiveram-se os gráficos conforme mostrados na FIG 14, 15 e 16.

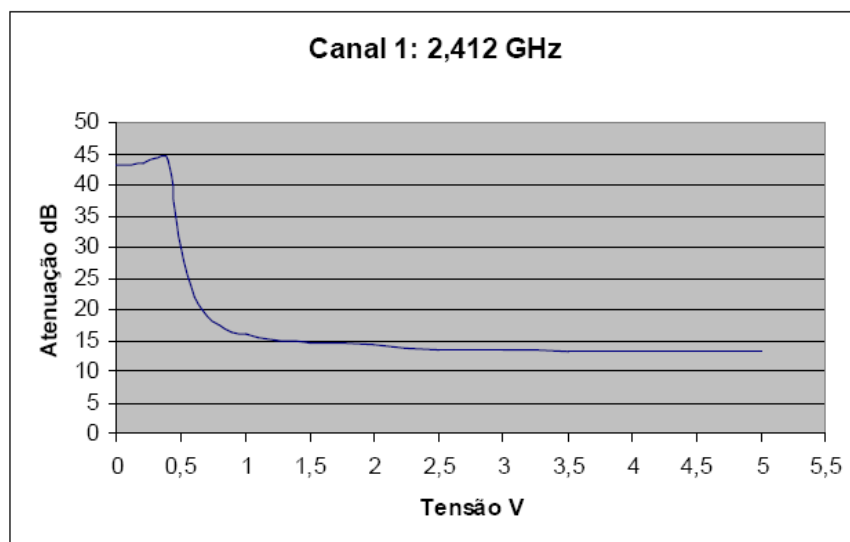


Figura 14. Atenuação da chave 2 no canal 1

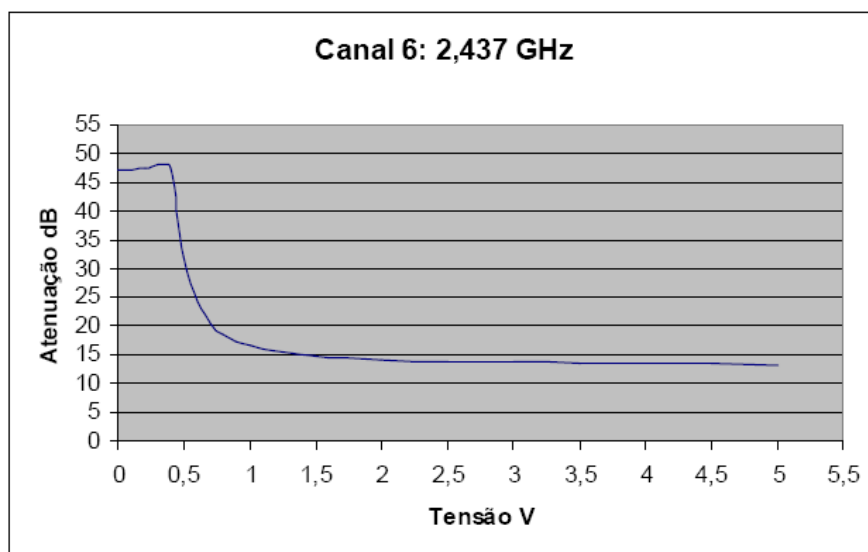


Figura 15. Atenuação da chave 2 no canal 6

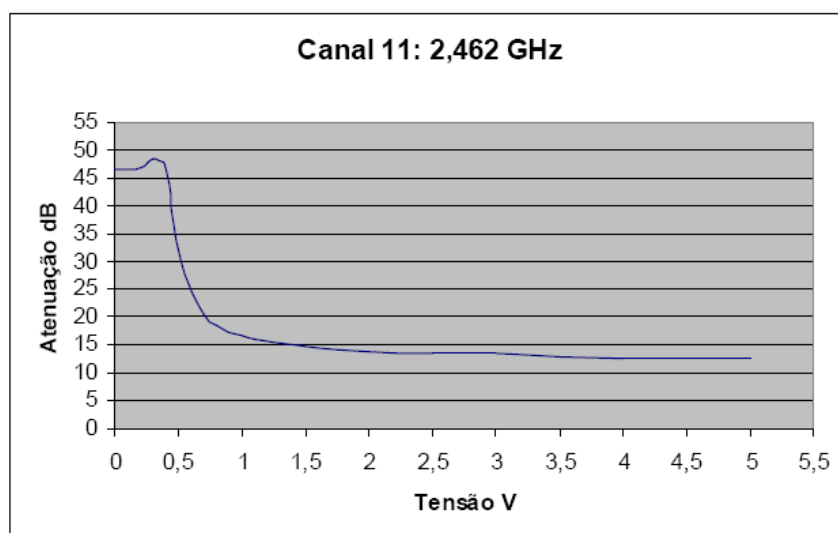


Figura 16. Atenuação da chave 2 no canal 11

Através dos dados coletados verifica-se que a sensibilidade da chave é considerada quando a tensão varia de 0 a 1V, sendo que para os valores de 1 a 5V apresenta-se uma atenuação praticamente constante, mas relevante em torno de 10dB.

ANEXO B – Utilização básica do LanTraffic

O Cenário básico de utilização pode ser observado na FIG. 17, os computadores podem ser emissor e receptor, nos experimentos realizados foi utilizado um como receptor e outro como transmissor.

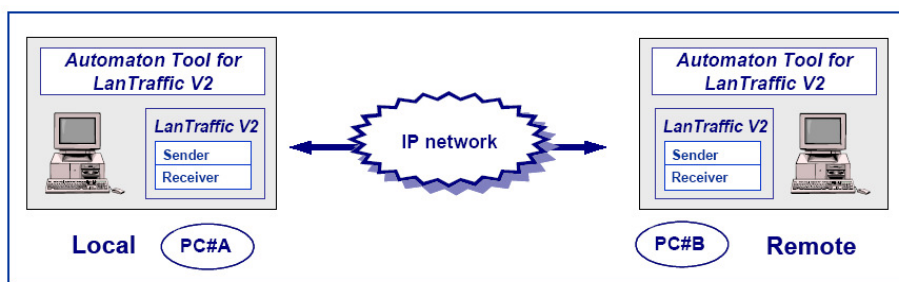


Figura 17. Cenário de utilização do LanTraffic

Na tela de configuração das medidas que é possível obter Jitter, RTT, entre outros parâmetros conforme se observa na FIG. 18.

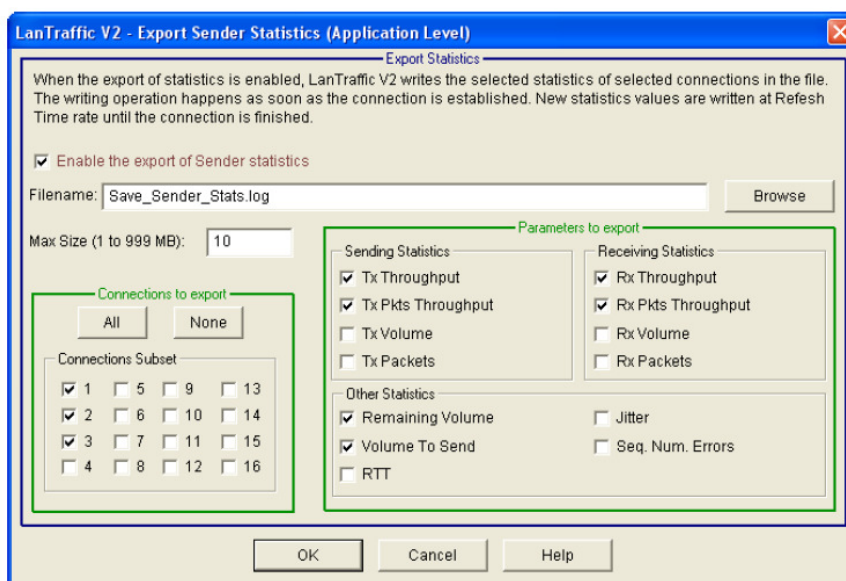


Figura 18. Configuração do LanTraffic

APÊNDICES

APÊNDICE A - Estabelecimento de comunicação VoIP

Para os testes de voz sobre IP na bancada, foi necessário estabelecimento e a manutenção da comunicação VoIP entre o PC1 e o PC2, conforme FIG. 1. Para isso foram utilizados o softphone eyeBeam em ambos os microcomputadores e o software Asterisk Server em um terceiro PC.

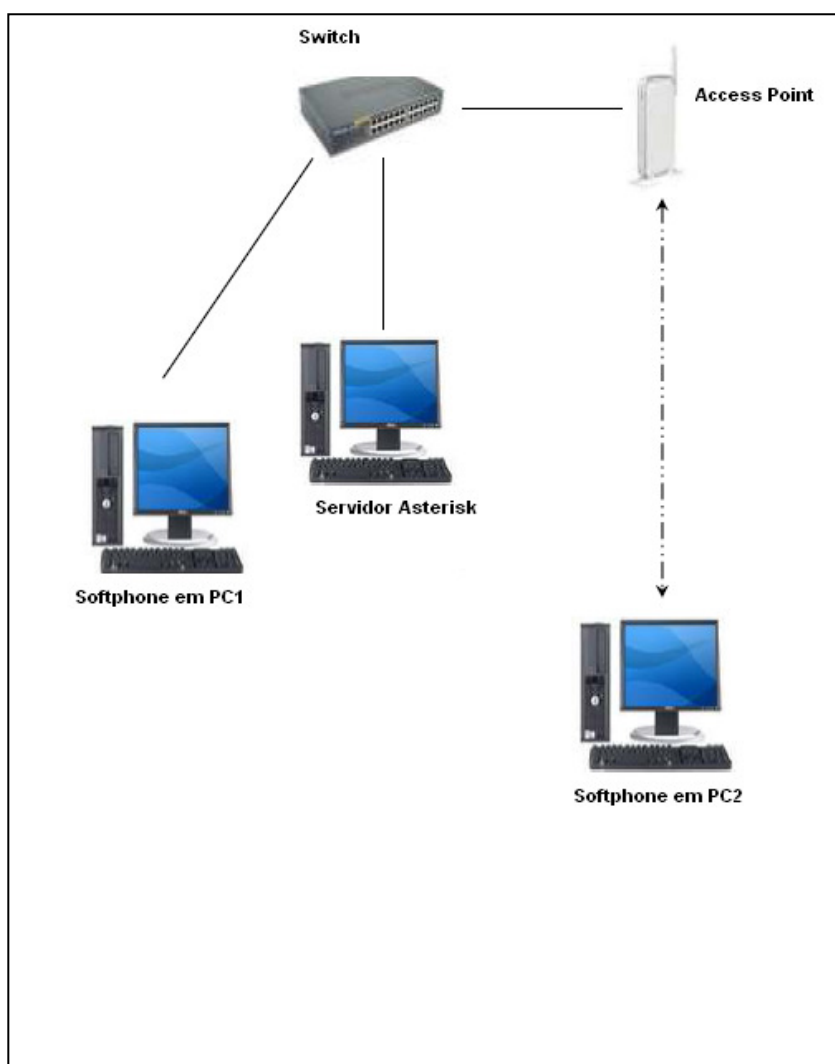


Figura 1. Estabelecimento de conexão VoIP

1 Instalação do Servidor Asterisk

Para a instalação de um servidor Asterisk, foi utilizado um microcomputador HP Centrino 1,74, com 1GM de memória e 80 GB de HD, contendo o Linux CentOS 4. Os produtos da eyeBeam foram compatíveis com o asterisk, o que assegurou a inter-operabilidade entre muitos produtos e serviços de telefonia VoIP.

1.1 Tela Inicial do Asterisk

A FIG. 2 apresenta a tela inicial do software.

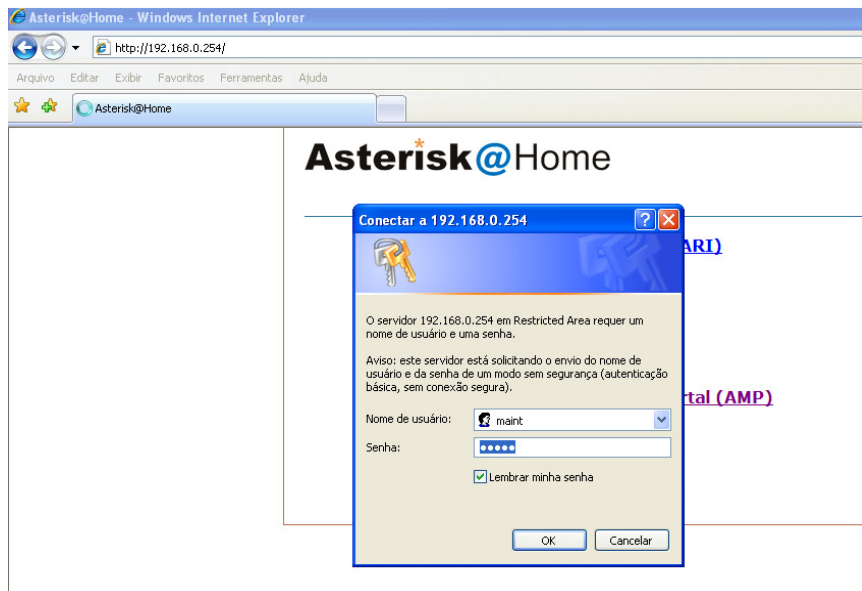


Figura 2. O login e senha para administração do sistema

1.2 Tela de Status do Servidor

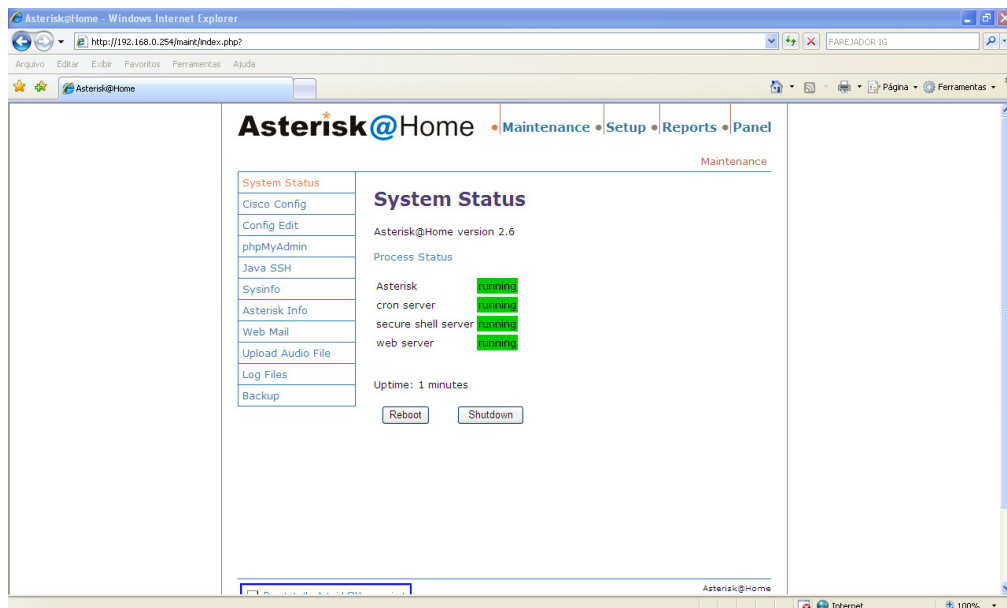


Figura 3. Tela que contém as configurações do servidor Asterisk.

1.3 Tela de Clientes do Asterisk

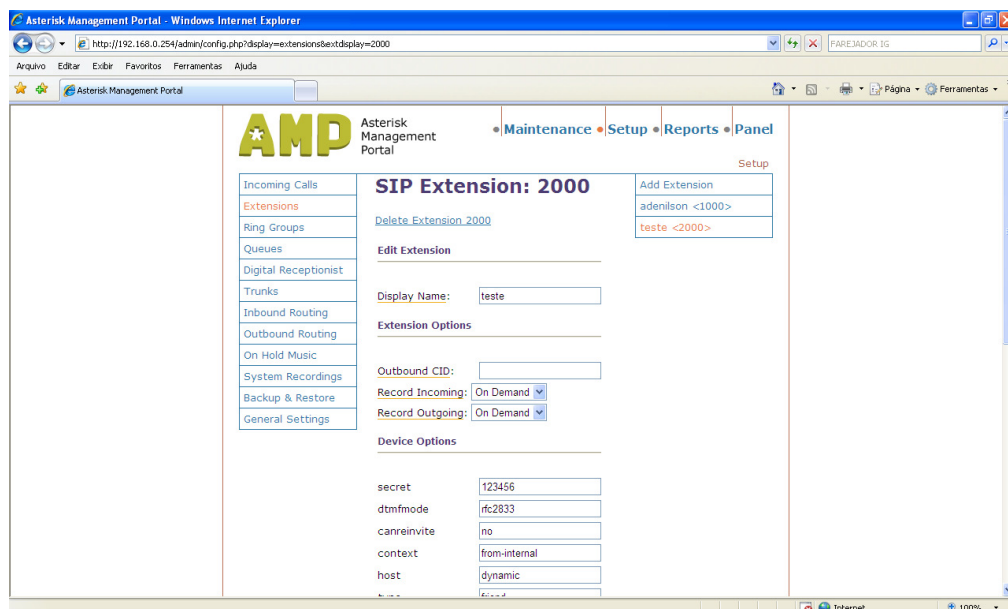


Figura 4. Clientes registrados no servidor Asterisk

A FIG. 4 apresenta uma das telas do servidor Asterisk, verifica-se que existem dois clientes registrados, o Ramal SIP Extension 2000 e o Ramal SIP Extension 1000.

1.4 Tela de Sessões

A FIG. 5 apresenta a tela do *software* onde são listados os dados de todas as sessões que estão ocorrendo no momento. Observa-se que, nesse caso o servidor tem o controle da comunicação VoIP que esta ocorrendo entre PC1 e PC2.

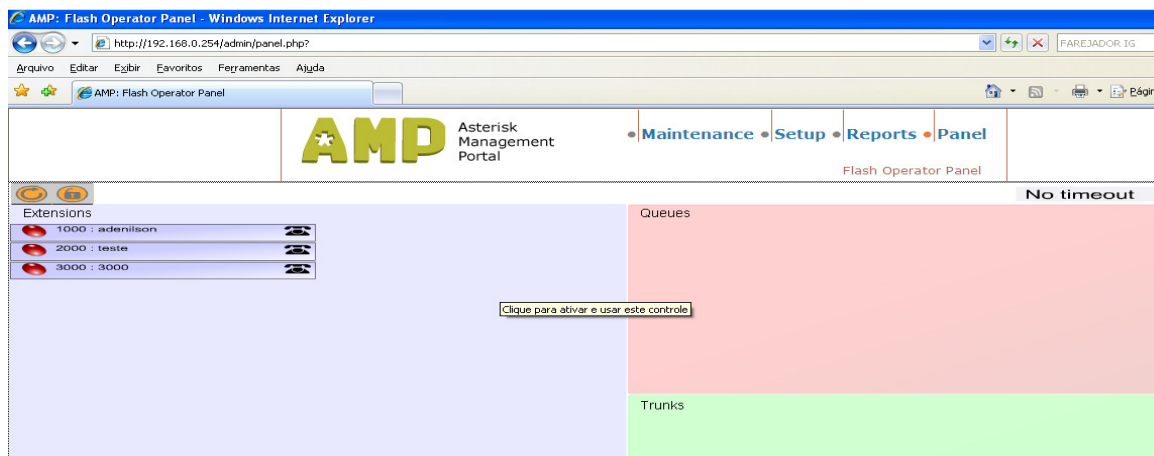


Figura 5. Sessão VoIP em andamento entre PC1 e PC2

Foi verificado que o software tem a capacidade de registrar automaticamente todos os clientes que estão na rede, assim como estabelecer, monitorar e finalizar essas sessões. No caso do experimento, foram registrados 2 clientes do Asterisk:

PC1: que é o softphone instalado no microcomputador cujo IP é 10.2.2.34

PC2: que é o softphone instalado no microcomputador cujo IP é 10.2.2.32

2 Instalação do softphone eyeBeam

Os softphones são aplicações de software que fazem a emulação de um telefone convencional. Esses softwares utilizam recursos das máquinas e transformam a voz de um usuário em pacotes que trafegam pela rede IP, possui fácil utilização, porém necessitam que o computador esteja ligado para que possa ser utilizado.

Para a instalação do softphone, foi utilizada uma maquina IBM Pentium IV 1.6, com 256 MB de memória e 40 GB de HD, contendo Windows XP. Foi escolhido o software eyeBeam 1.5, disponível em: www.counterpath.com. Esse software faz ligações através do computador para os demais clientes Asterisk.

2.1 Configuração do eyeBeam

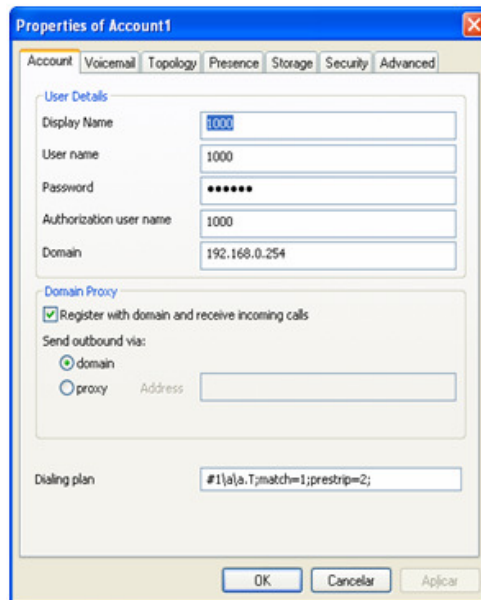
Após feita a instalação do software é necessária que se faça a seguinte configuração:



Figura 6. Tela Inicial do Softphone

2.1.1 Configuração da conta registrada no Asterisk.

Após clicar no botão de configuração, clicar em SIP Account Settings será apresentada a tela onde se cadastra o registro do servidor Asterisk.



The image shows a screenshot of the 'Properties of Account1' dialog box in Asterisk. The dialog has several tabs: 'Account', 'Voicemail', 'Topology', 'Presence', 'Storage', 'Security', and 'Advanced'. The 'Account' tab is selected. Under 'User Details', there are input fields for 'Display Name' (containing '1000'), 'User name' (containing '1000'), 'Password' (masked with '*****'), 'Authorization user name' (containing '1000'), and 'Domain' (containing '192.168.0.254'). Under 'Domain Proxy', there is a checked checkbox for 'Register with domain and receive incoming calls'. Below this, there are radio buttons for 'Send outbound via: domain' (selected) and 'proxy'. The 'Dialing plan' field contains the regex '#1|a.T;match=1;prestrip=2;'. At the bottom, there are 'OK', 'Cancelar', and 'Aplicar' buttons.

Figura 7. Tela de configuração da conta do Asterisk

Para fazer as configurações devem ser preenchidos os campos:

Display Name: Nome do Usuário

User Name: Ramal cadastrado no servidor Asterisk

Password: Senha do ramal cadastrado no servidor Asterisk

Authorization user name: nome do usuário

Domain: Endereço IP do servidor Asterisk.

2.1.2 Escolha do codec a ser utilizado

Através do softphone é possível escolhermos o codec a ser utilizado na comunicação, na FIG 8. é apresentada a tela de configuração e escolha do codec.

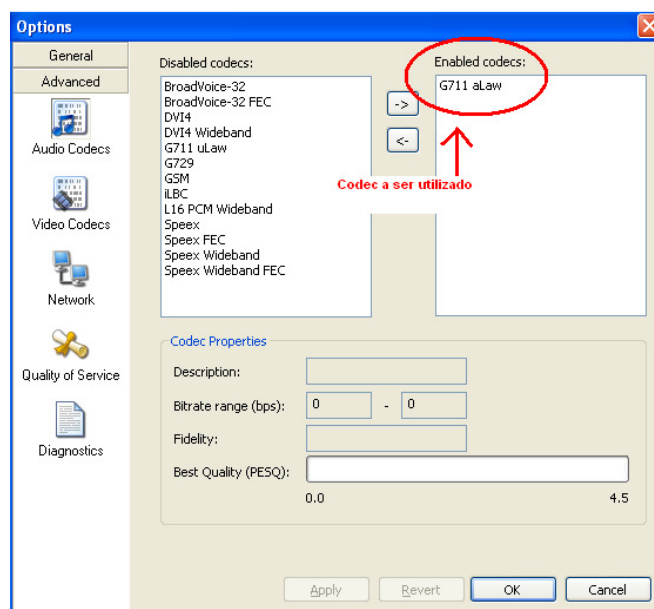


Figura 8. Tela de escolha do codec a ser utilizado

Na FIG 8. é possível observar que o codec habilitado para utilização é o G711.

3 Componentes do Protocolo SIP

O SIP (Session Initiation Protocol) é um protocolo ponto-a-ponto. Os pontos de uma sessão são chamados de UA (User Agents) que conforme as funções desempenhadas classificam-se em:

- **UAC (User Agent Client)** – Uma aplicação cliente que faz um pedido SIP.
- **UAS (User Agent Server)** – Uma aplicação servidora que responde ao pedido SIP.
- **UA (User Agent)** – Terminal de rede SIP (telefones SIP, ou gateway para outras redes), contém UAC e UAS.

- **Servidor Proxy** – Recebe pedidos de conexão de um UA e transfere-o para outro servidor proxy se a estação em particular não está em sua administração.
- **Servidor de Redirecionamento** – Recebe pedidos de conexão e envia-os de volta ao emissor incluindo os dados de destino ao invés de enviá-los diretamente à parte chamada.
- **Servidor de Localização** - Recebe pedidos de registro de um UA e atualiza a base de dados de terminais com eles.

Todas as seções do servidor (Proxy, Redirect e Location) estão tipicamente disponíveis em uma única máquina física chamada Proxy Server, que é responsável pela manutenção da base de dados de clientes, estabelecimento de conexões, manutenção, termino e redirecionamento de chamadas. Na FIG. 9 temos os componentes da arquitetura SIP.

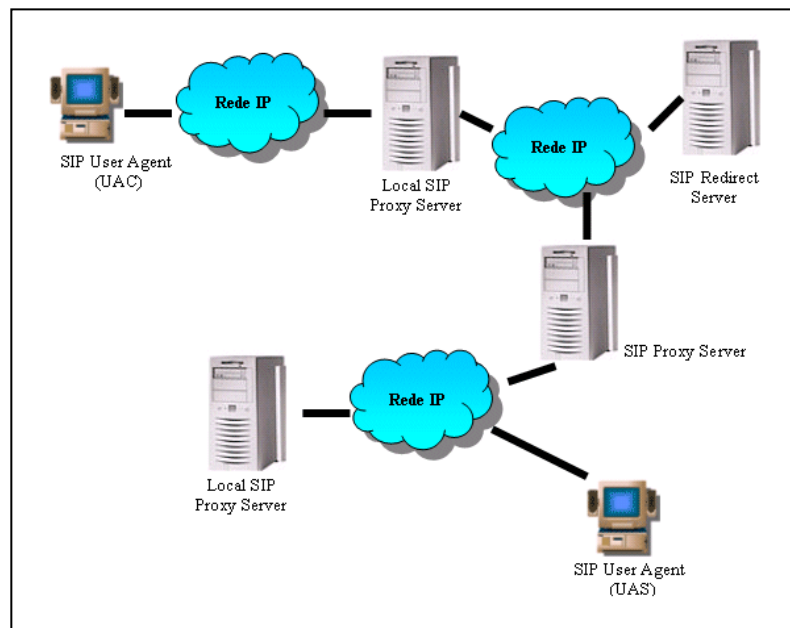


Figura 9. Componentes da arquitetura SIP

3.1 Processo de Registro do SIP

O protocolo SIP emprega um componente chamado “Registrar” que é um servidor que aceita pedidos “Register” e coloca a informação que ele recebe nestes pedidos no servidor de localização para o domínio que ele gerência. O SIP oferece a capacidade de descobrimento. Se um usuário inicia uma sessão com outro usuário, o SIP deve descobrir o host atual onde o usuário pode ser alcançado. Se um usuário inicia uma sessão com outro usuário, o SIP deve descobrir o host atual onde o usuário pode ser alcançado. Este processo de descobrimento é feito pelo Location Server, que recebe o pedido, determina para onde manda-lo baseado no conhecimento da localização do usuário. Para isso existe uma tabela de localização por domínio.

Antes que um cliente SIP possa receber chamadas, ele precisa se registrar em uma base de localização. Para isso, o SIP define um endereço bem conhecido all server (sip.mcat.net:224.0.1.75). Um cliente pode registrar seu endereço IP atual com uma mensagem Register multicast. Cabe observar que, o estado de registrar não é permanente, caso ele não seja atualizado ele expirará após uma hora. A FIG. 10 apresenta o processo de registro de um cliente em um servidor SIP.

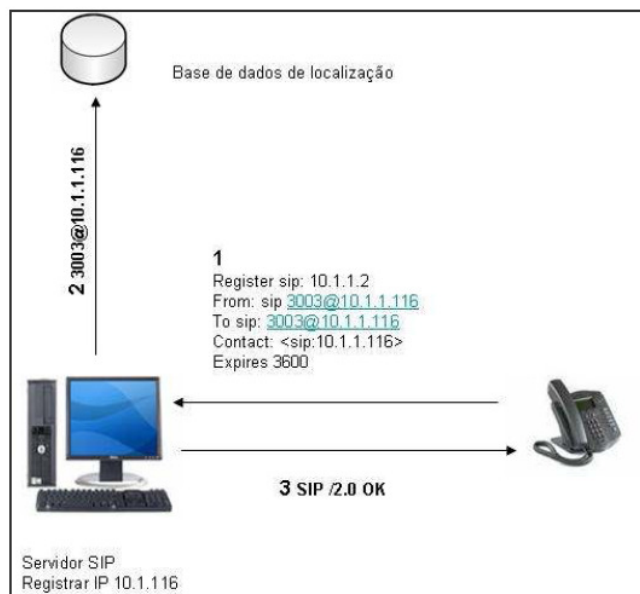


Figura 10. Processo de registro do SIP

3.2 Mensagens Básicas

Para que haja uma intercomunicação entre os elementos SIP, existe troca de algumas mensagens básicas:

- **INVITE:** Convida um usuário a iniciar uma sessão SIP
- **ACK:** Reconhece o INVITE
- **BYE:** Termina uma conexão
- **REGISTER:** Faz o registro do UA no SIP proxy
- **OPTIONS:** Traz as informações sobre as capacidades suportadas

Um servidor SIP pode retornar diversas respostas. Seguem abaixo as mais importantes:

- 1XX – (100- tentando, 180 - chamando)
- 2XX – Solicitação completada com sucesso (200 – OK)
- 3XX – Redirecionamento de chamada (302 – temporariamente movido)
- 4XX – Erro de cliente (403 – Proibido)
- 5XX – Erro de servidor (500 – Erro interno do servidor)
- 6XX – Falha global (606 – Não aceitável)

Temos na FIG. 11 todas as mensagens que são trocadas entre a máquina servidora e as máquinas clientes.

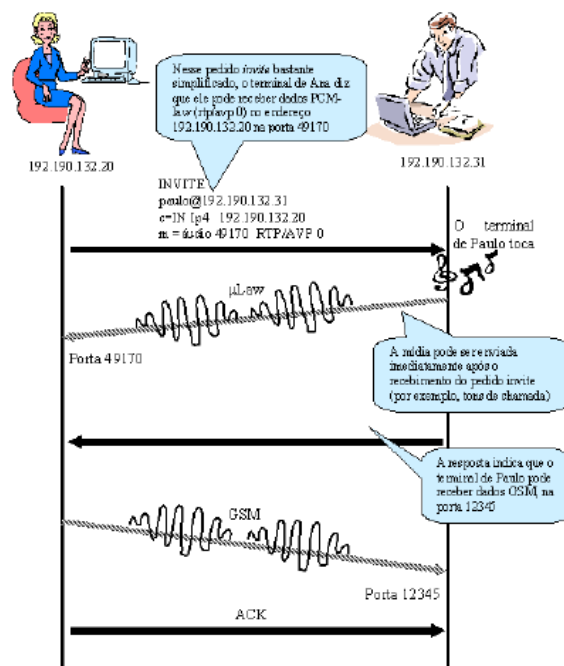


Figura 11. Troca de mensagens com um Proxy Server

APÊNDICE B – AMOSTRA DE MEDIDAS DE JITTER DOS CODECS G729, G711, G723 E GSM NO CENÁRIO 1

G729	G711	G723	GSM
0.292	0.192	0.191	2.192
0.921	0.921	0.911	2.921
0.201	0.101	0.101	2.121
1.212	1.212	1.111	1.212
1.119	1.019	1.119	1.219
1.102	1.002	1.101	1.222
1.118	1.018	1.118	1.218
0.820	0.820	0.810	2.822
0.939	0.939	0.939	2.939
1.192	1.092	1.191	1.290
1.004	1.004	1.004	1.224
1.114	1.014	1.114	1.214
0.912	0.912	0.911	2.912
1.121	1.021	1.111	1.221
0.124	0.124	0.114	1.124
0.183	0.183	0.183	2.183
0.811	0.811	0.811	2.811
1.299	1.299	1.199	1.299
0.289	0.189	0.189	2.189
1.092	1.092	1.091	1.292
1.002	1.002	1.001	1.245
1.141	1.041	1.141	1.241
1.024	1.024	1.014	1.224
1.241	1.241	1.141	1.241
0.914	0.914	0.914	2.914
1.041	1.041	2.042	1.241
0.912	0.912	0.922	2.912
1.421	1.421	2.422	1.421
1.133	1.033	2.233	1.233
1.199	1.099	1.199	1.299
1.011	1.011	1.011	1.211
1.121	1.021	1.011	1.221
1.194	1.094	1.194	1.294
1.142	1.042	1.141	1.242
0.831	0.831	0.831	2.801
0.111	0.111	0.112	2.111
1.113	1.013	1.113	1.213
1.212	1.212	1.111	1.212

APÊNDICE C – AMOSTRA DE MEDIDAS DE JITTER DOS CODECS G729, G711, G723 E GSM NO CENÁRIO 2

G729	G711	G723	GSM
5.292	1.292	4.292	2.292
5.925	1.921	4.924	2.922
5.201	1.201	4.201	2.202
2.212	2.212	2.212	2.222
2.119	2.119	2.119	2.229
2.502	2.102	2.402	2.202
2.158	2.118	2.148	2.228
5.820	1.820	5.820	2.820
5.939	1.939	4.939	2.939
2.192	2.192	2.192	2.292
2.004	2.004	2.004	1.004
2.154	2.114	2.144	1.114
5.912	1.912	4.912	1.911
2.125	2.121	2.124	2.222
5.524	1.124	4.424	2.224
5.583	1.183	4.483	2.283
5.815	1.811	4.814	2.822
2.299	2.299	2.299	2.299
5.289	1.289	4.289	2.289
2.092	2.092	2.092	2.092
2.002	2.002	2.002	2.002
2.145	2.141	2.144	2.242
2.024	2.024	2.024	2.024
2.245	2.241	2.244	1.141
5.954	1.914	4.944	2.924
2.045	2.041	2.044	2.042
5.952	1.912	4.942	2.922
2.425	2.421	2.424	2.422
2.533	2.133	2.433	2.233
2.199	2.199	2.199	2.299
2.051	2.011	2.041	2.022
2.521	2.121	2.421	2.222
2.194	2.194	2.194	2.294
2.142	2.142	2.142	2.242
5.835	1.831	4.834	2.832
5.555	1.111	4.444	1.111
2.113	2.113	2.113	2.223
2.252	2.212	2.242	2.222

APÊNDICE D – AMOSTRA DE MEDIDAS DE JITTER DOS CODECS G729, G711, G723 E GSM NO CENÁRIO 3

G729	G711	G723	GSM
6.797	5.797	5.494	6.691
6.976	5.976	5.946	5.965
6.701	5.701	5.402	4.701
7.212	7.212	4.222	6.212
7.119	7.119	4.229	7.156
7.607	7.607	4.604	7.208
7.168	7.168	4.264	6.153
6.820	5.820	5.420	5.320
6.939	5.939	5.939	5.939
7.197	7.197	4.294	6.177
7.004	7.004	4.004	6.101
7.164	7.164	4.264	7.654
6.912	5.912	5.922	5.982
7.176	7.176	4.246	7.135
6.574	5.574	5.544	5.574
6.583	5.583	5.543	5.533
6.816	5.816	5.426	5.315
7.299	7.299	4.299	7.299
6.789	5.789	5.449	5.739
7.097	7.097	4.094	5.037
7.007	7.007	4.004	6.067
7.145	7.145	4.245	6.445
7.024	7.024	4.024	6.524
7.246	7.246	4.246	7.245
6.964	5.964	5.964	5.954
7.046	7.046	4.046	6.145
6.962	5.962	5.962	5.952
7.475	7.475	4.445	6.465
7.533	7.533	4.533	6.433
7.199	7.199	4.299	6.429
7.061	7.061	4.062	5.156
7.571	7.571	4.542	6.623
7.194	7.194	4.294	5.674
7.142	7.142	4.242	5.172
6.835	5.835	5.435	5.335
6.655	5.655	5.655	5.555
7.113	7.113	4.223	6.173
7.262	7.262	4.262	6.236