



**Eduardo Rodrigues Vale**

**Técnicas para a Melhoria de Desempenho da  
Transmissão de Voz no Sistema UMTS**

**Tese de Doutorado**

Tese apresentada como requisito parcial para  
obtenção do grau de Doutor pelo Programa de Pós-  
graduação em Engenharia Elétrica do Departamento  
de Engenharia Elétrica da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Marco A. Grivet Mattoso Maia

Rio de Janeiro

Agosto de 2006



**Eduardo Rodrigues Vale**

**Técnicas para a Melhoria de Desempenho da  
Transmissão de Voz no Sistema UMTS**

Tese de Doutorado apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Dr. Marco A. Grivet Mattoso Maia**  
**Orientador**

Centro de Estudos de Telecomunicações – PUC-Rio

**Dr. Andre Noll Barreto**  
INST. NOKIA DE TECNOLOGIA

**Dr. Luiz Pinto de Carvalho**  
UFF

**Dr. Marcelo Sampaio de Alencar**  
UFCG

**Dr. Luiz Alencar Reis da Silva Mello**  
Centro de Estudos de Telecomunicações – PUC-Rio

**Dr. Julio César Rodrigues Dal Bello**  
UFF

**Dr. Rodolfo Sabóia Lima de Souza**  
Centro de Estudos de Telecomunicações – PUC-Rio

**Prof. José Eugenio Leal**  
Coordenador Setorial do Centro  
Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 11 de agosto de 2006

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e dos orientadores.

### **Eduardo Rodrigues Vale**

Graduou-se em Engenharia Elétrica com ênfase em Telecomunicações na PUC-Rio (Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro) em 1972. Concluiu o Mestrado em Telecomunicações em 1975, também na PUC-Rio. Foi Professor da PUC-Rio de 1973 até 1977. Atualmente é Professor do Departamento de Telecomunicações da UFF (Universidade Federal Fluminense).

#### Ficha Catalográfica

Vale, Eduardo Rodrigues

Técnicas para a melhoria de desempenho da transmissão de voz no sistema UMTS / Eduardo Rodrigues Vale ; orientadores: Marco A. Grivet Mattoso Maia. Rio de Janeiro : PUC, Departamento de Engenharia Elétrica, 2006.

129. ; 30 cm

Tese (Doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia Elétrica – Teses. 2. Sistemas celulares de terceira geração. 3. UMTS. 4. VoIP. 5. 3GPP. 6. WCDMA. I. Maia, Marco A. Grivet Mattoso. II. Brandão, João Célio B. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. IV. Título.

CDD: 621.3

Ao meu falecido pai, Prof. Eduardo Valle,  
meu amigo e primeiro coordenador  
no campo das ciências exatas

## Agradecimentos

Aos meus amigos Marcos Grivet e João Célio que, além de proporcionarem uma orientação segura, foram também co-autores deste trabalho.

Aos professores que participaram da Banca examinadora.

À PUC-Rio, que forneceu toda a infraestrutura para a realização deste trabalho.

À UFF que proporcionou todo o suporte necessário.

Aos meus antigos colegas do CETUC, que me receberam com entusiasmo e carinho, sempre me ajudando, quando possível, no desempenho das tarefas.

Aos meus colegas da UFF, que sempre me incentivaram para a realização do Doutorado.

Ao meu filho Dudu, que foi o meu agradável companheiro de sala de aula, e com quem pude sempre trocar informações e mesmo receber auxílio direto, como na programação de simulações com o Matlab.

À minha dedicada e eterna esposa Isa, que sempre abriu mão de suas vontades em favor de meus estudos.

À minha mãe Luzia que, por conta própria, sempre divulgava na Comunidade Evangélica que seu "filhinho" era aluno de Doutorado da PUC.

## Resumo

Vale, Eduardo Rodrigues; Maia, Marco Antonio Grivet Mattoso (Orientador). **Técnicas para a Melhoria de Desempenho da Transmissão de Voz no Sistema UMTS**. Rio de Janeiro, 2006. 129p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A partir da necessidade do transporte de informação multimídia, foram desenvolvidos os Sistemas Celulares de Terceira Geração, ainda em fase de padronização, cujo candidato mais promissor é o UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*). De forma consonante com a tendência mundial de utilização crescente da tecnologia IP (*Internet Protocol*) nas redes fixas, o UMTS veio a incorporar este protocolo, que apresenta uma maior flexibilidade para a introdução de novos serviços. Assim, na arquitetura do UMTS existem atualmente dois modos de transmissão, a Comutação de Circuitos e a Comutação de Pacotes. Esta Tese de Doutorado descreve, inicialmente, os processos de estabelecimento de chamadas de voz no UMTS, tanto na modalidade de Comutação de Circuitos como na de Comutação de Pacotes. Em seguida, procura fazer uma avaliação comparativa da eficiência na execução de chamadas de voz nestas duas modalidades, com ênfase de aplicação no sentido *uplink* de transmissão. Neste processo, são desenvolvidas várias formas de otimização de desempenho da transmissão na interface aérea do UMTS, em particular na Comutação de Pacotes, visando tornar este modo de transmissão competitivo com o modo de Comutação de Circuitos em termos de eficiência na transmissão de voz. Embora o tratamento aqui apresentado se refira ao UMTS-FDD (*UMTS Frequency Division Duplex*), as técnicas aqui desenvolvidas também encontram aplicação em outros Sistemas Celulares de Terceira Geração congêneres, tal como o CDMA 2000.

## Palavras-chave

Sistemas Celulares de Terceira Geração; Sistemas Móveis Celulares; UMTS - *Universal Mobile Telecommunications System*; Voz sobre IP (VoIP) em Sistemas Móveis de Terceira Geração; 3GPP - *Third Generation Partnership Project*; WCDMA

## Abstract

Vale, Eduardo Rodrigues; Maia, Marco Antonio Grivet Mattoso (Advisor). **Techniques for Voice Transmission Improvement in UMTS Systems**. Rio de Janeiro, 2006. 129p. Doctoral Dissertation – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

With the advent of multimedia traffic, Third Generation mobile systems were introduced, with the UMTS as the most promissor candidate. In consonance with the global trend of utilization of the IP technology in fixed networks, the UMTS developers decided to incorporate this protocol, which presents more facilities for the introduction of new services. Therefore, the UMTS architecture has two transmission modes: Circuit Switching and Packet Switching Modes. This Doctoral Dissertation initially describes the call setup processes (call flows) for those transmission modes. It follows a comparative evaluation of the efficiency aspect related to calls executed in both modes, considering the case of uplink transmission. In this process, several optimization techniques are introduced, aiming at the improvement of energy consumption in the air interface. The final objective is to turn the Packet Switching Mode competitive with the Circuit Switching Mode, relative to the energy consumed for the transmission of voice calls. Though the treatment here presented refers to the UMTS-FDD technology, all the results are equally applicable to other similar systems, like the CDMA-2000.

## Keywords

Third Generation Cellular Systems; Mobile Cellular Systems; UMTS - Universal Mobile Telecommunications System; Voice over IP (VoIP) in Third Generation Cellular Systems; 3GPP - Third Generation Partnership Project; CDMA

## Sumário

1. Introdução	20
1.1. Um breve Histórico	20
1.2. Serviços e Aplicações no UMTS	21
1.3. Desenvolvimento do Trabalho	22
2. Arquitetura do UMTS	28
2.1. Componentes Funcionais	28
2.2. Arquitetura de Protocolos	31
2.2.1. Descrição das Mensagens dos Protocolos	34
3. Execução de Chamadas no UMTS	37
3.1. Chamadas de Voz no Modo IMS - Origem no UE	37
3.2. Chamadas de Voz no Modo CS - Origem no UE	41
4. Transmissão de Voz na Interface Aérea	44
4.1. Tratamento do Sinal no Nível RLC	44
4.1.1. Formalismo Matemático para o Processo de Otimização Relativo ao Padding	45
4.2. Esquemas de Multiplexação de Sinal - Multiplexação Uplink	49
4.3. Esquemas de Multiplexação de Sinal - Multiplexação Downlink	52
4.4. Rate Matching	53
4.4.1. Conceitos Gerais	54
4.4.2. Desempenho da Transmissão com Código Corretor de Erro e Rate Matching	55
4.4.3. Procedimentos de Otimização para o Rate Matching	59
4.5. Transmissão de Informação nas Camadas Inferiores	63



5. Transmissão de Voz nos Modos CS e IMS	65
5.1. Multiplexação Uplink do Sinal de Voz para o Modo CS	65
5.2. Aplicação do Processo de Otimização para o Modo CS	67
5.3. Formação do Quadro de Voz para o Modo IMS	68
5.3.1. Cabeçalho de Nível 2	68
5.3.2. Cabeçalho do IPv6	69
5.3.3. Cabeçalho do UDP	70
5.3.4. Cabeçalho do RTP	71
5.3.5. Payload do RTP	72
5.4. Tipos de Quadros em uma Conexão de Voz no Modo IMS	73
5.5. Aplicação para a Transmissão de VoIP no IMS (codec AMR - 12,2 Kbps)	75
6. Redução do Overhead na Interface Aérea para os Pacotes de VoIP Transmitidos no Modo IMS	79
6.1 Conceituação Geral	79
6.1.1. Eliminação da Transmissão do <i>Checksum</i> do UDP	80
6.1.2. Operação do RLC em Modo Transparente	81
6.1.3. Redução do CRC de Nível Físico	81
6.2. Análise do Sistema Convencional de Transmissão de VoIP pelo IMS	82
6.3. Análise do Sistema Alternativo de Transmissão de VoIP pelo IMS	86
6.4. Descrição da Operação do PDCP Modificado	88
7. Otimização para a Transmissão de Voz no Modo IMS	90
7.1. Cálculo da Alternativa Otimizada	90
7.2. Caso de Transferência de Voz Durante uma Conversação Telefônica	93
7.2.1. Premissas Consideradas	93
7.2.2. Cálculo para Otimização	95
7.3. Sinalização SIP	100
8. Conclusões	103

9. Referências Bibliográficas	106
Apêndice 1	110
Otimização do <i>Padding</i> para Grupos de Pacotes	
Apêndice 2	114
Considerações sobre o Codec AMR e sua Utilização no UMTS	
Apêndice 3	117
Descrição do Simulador Desenvolvido para o Rate Matching	
3.1. Descrição dos Simuladores para Utilização com Codificadores Convolucionais	117
3.2. Descrição do Codificador Turbo	118
3.3. Descrição dos Simuladores para Utilização com Codificadores Turbo	119
Apêndice 4	121
Um Modelo para a Função $P(N, \Delta N, E_b/N_0)$	
Apêndice 5	122
Descrição Simplificada do ROHC - Robust Header Compression	
5.1. Considerações Iniciais	122
5.2. Princípio de Operação	123
5.3. Tipos de Pacotes	124
5.4. Operação no Modo Confiável	126
Apêndice 6	128
Descrição do Simulador Utilizado para Análise do <i>Checksum</i> e CRC	

## Lista de Figuras

Figura 1- Componentes do UMTS	28
Figura 2 - Vista Detalhada da UTRAN	30
Figura 3 - Arquitetura de Protocolos (Modo CS)	31
Figura 4: Arquitetura de Protocolos (Modo IMS)	31
Figura 5 - Sub-Camadas do Nível 3	33
Figura 6 - Protocolos da Interface Iu (IMS/CS)	33
Figura 7a - Chamada IMS Originada no UE	37
Figura 7b - Chamada IMS Originada no UE (cont.)	38
Figura 7c - Chamada IMS Originada no UE (cont.)	39
Figura 7d - Chamada IMS Originada no UE (cont.)	39
Figura 8a - Chamada CS de Voz	41
Figura 8b: Chamada CS de Voz (Cont.)	41
Figura 8c: Chamada CS de Voz (Cont.)	42
Figura 9: Descrição das Terminações	42
Figura 10: Grafo para Otimização de Padding	48
Figura 11a - Multiplexação <i>Uplink</i>	49
Figura 11b - Multiplexação <i>Uplink</i> (Cont.)	51
Figura 12a - Multiplexação <i>Downlink</i>	52
Figura 12b - Multiplexação <i>Downlink</i> (cont.)	52
Figura 13 - Duplicação de Bits no Rate Matching	54
Figura 14 - Variação da Probabilidade de Erro com Eb/No	55
Figura 15 - Equivalência para o <i>Rate Matching</i> (repetição de bits)	56
Figura 16 - Exemplo de Aplicação (CC2)	57
Figura 17 - Exemplo de Aplicação (CC3)	58
Figura 18 - Exemplo de Aplicação (TC3)	58
Figura 19 - Região de Interesse e Ponto Ótimo	62
Figura 20 - Definições de Unidades de Transporte de Informação	63
Figura 21 - Transmissão do Sinal de Voz (caso CS)	66
Figura 22 - Quadro de Voz no IMS	68

Figura 23 - Especificação do Cabeçalho de Nível 2	69
Figura 24 - Cabeçalho do IPv6	70
Figura 25 - Cabeçalho do UDP	70
Figura 26 - Cabeçalho do RTP (comprimento dos campos em bits)	71
Figura 27 - Formação do RTP	72
Figura 28 - Quadro RTP para o Codec AMR em 12,2 Kbps (modo <i>Bandwidth Efficient</i> )	73
Figura 29 - Quadro SID (modo <i>Bandwidth Efficient</i> )	73
Figura 30 - Pacotes de uma Conexão VoIP	74
Figura 31 - Transmissão do Sinal de Voz (caso IMS)	77
Figura 32 - Arquitetura de Camadas para o IMS (Simplificada)	82
Figura 33 - Pacote de Voz antes da compressão do cabeçalho	82
Figura 34 - Pacote de Voz no Ponto (2) da Figura 32	83
Figura 35 - FER x BER para CRC-16	84
Figura 36 - FER x BER para CRC-8	85
Figura 37 - FER x BER para CRC-4	85
Figura 38 - FER x GANHO para CRC-8 e Distribuição de <i>Rayleigh</i>	86
Figura 39 - Arquitetura Alternativa de Camadas para o IMS (Simplificada)	87
Figura 40 - Pacote de Voz no Ponto (2) da Figura 38	87
Figura 41 - FER x BER para CRC-8 Protegendo apenas o Cabeçalho	88
Figura 42 - Transmissão Otimizada do Sinal de Voz (caso IMS)	91
Figura 43 - Composição do Retardo para Estabelecimento da Conexão (IMS)	101
 <b>Figuras dos Apêndices</b>	
Figura 1.1 - Resultado para o Codec AMR	112
Figura 1.2 - Resultado para o Codec AMR-WB	112
Figura 2.1 - Formato do Quadro Rádio do Codec AMR	114
Figura 2.2 - Envio de Quadros de Voz/SID	116
Figura 3.1 - Simulador para Repetição de Bits (CC2 e CC3)	117
Figura 3.2 - Simulador para Supressão de Bits (CC2 e CC3)	118

Figura 3.3 - Codificador do PCCC	118
Figura 3.4 - Decodificador do PCCC	119
Figura 3.5 - Simulador para Repetição de Bits (TC3)	119
Figura 3.6 - Simulador para Supressão de Bits (TC3)	120
Figura 5.1 - Pacotes de Ordem 0	124
Figura 5.2 - Pacotes de Ordem 1	125
Figura 5.3 - Pacote de Ordem 2	125
Figura 5.4 - Extensão 3	126
Figura 5.5 - Pacotes de <i>Feedback</i>	126
Figura 6.1 - Simulador para Obtenção das Curvas das Figuras 35, 36 e 37	128
Figura 6.2 - Simulador para Obtenção das Curvas da Figura 40	129

## Lista de Quadros

Quadro 1 - Resultado do Algoritmo de Otimização - Caso CS	67
Quadro 2 - Resultado do Algoritmo de Otimização - Caso IMS	84
Quadro 3 - Resultado do Algoritmo de Otimização - Caso IMS Otimizado	91
Quadro 4 - Parâmetros para um Tráfego de Voz de 10min no IMS	95
Quadro 5 - Resultados para a Chamada IMS com Parâmetros Otimizados	98
Quadro 6 - Resultados para a Chamada CS com Parâmetros Otimizados	99

### Quadros dos Apêndices

Quadro 2.1 - Parâmetros do Quadro AMR	115
Quadro 2.2 - Parâmetros do Quadro AMR-WB	115
Quadro 2.3 - Classificação dos Quadros de Voz	116

## Siglas

3GPP - Third Generation Partnership Project  
ACM - Address Complete Message  
ACK - Acknowledge  
AM - Acknowledge Mode (RLC)  
AMR - Adaptive Multi Rate  
AMR-WB - AMR Wideband  
APP - A Posteriori Probability  
AS - Access Stratum  
ATM - Asynchronous Transfer Mode  
BER - Bit Error Rate  
BMC - Broadcast/Multicast Control  
CC2 - Codificador Convolutacional de taxa 1/2  
CC3 - Codificador Convolutacional de taxa 1/3  
CCTrCH - Common Composite Transport Channel  
CDMA - Code Division Multiple Access  
CM - Connection Management  
CMR - Codec Mode Request  
CN - Core Network, Comfort Noise  
COPS - Common Open Policy Service  
CRC - Cyclic Redundant Check  
CS - Circuit Switching  
CSCF - Call State Control Function  
CSRC - Contributing Source Counter  
drma - Dynamic Rate Matching Attribute  
DTX - Discontinuous Transmission  
E - Extension  
ETSI - European Telecommunications Standards Institute  
FER - Frame Error Rate  
FO - First Order

FQI - Frame Quality Indicator  
FT - Frame Type  
GERAN - GPRS Radio Access Network  
GGSN - Gateway GPRS Support Node  
GMM - GPRS Mobility Management  
GMSC Server - GPRS MSC Server  
GPRS - General Packet Radio Service  
GSMS - GPRS Short Message Service  
HSS - Home Subscriber Service  
IAM - Initial Address Message (mensagem #SS7)  
I-CSCF - Interrogation CSCF  
IE - Information Element  
IETF - Internet Engineering Task Force  
IMS - IP Multimedia Subsystem  
IN - Intelligent Network  
IP - Internet Protocol  
IPv4 - Internet Protocol version 4  
IPv6 - Internet Protocol version 6  
IR - Initialization and Refresh  
ISUP - ISDN User Part  
L1, L2, ... - Níveis da Arquitetura OSI  
LI - Length Indicator  
M3UA - MTP3 User Adaptation Layer (Protocolo SS7)  
MAC - Medium Access Control  
ME - Mobile Equipment  
MGCF - Media Gateway Control Function  
MGW - Media Gateway  
MM - Mobility Management  
MRF - Media Resource Functions  
MSC Server - Mobile Switching Center Server  
NACK - Non Acknowledge  
NAS - Non Access Stratum  
NGN - Next Generation Network  
P - Probabilidade de Erro



PAD - Padding  
P-CSCF - Proxy CSCF  
PDCP - Packet Data Convergence Protocol  
PDF - Policy Decision Function  
PDP - Packet Data Protocol  
PDU - Protocol Data Unit  
PEP - Policy Enforcement Point  
PLMN - Public Land Mobile Network  
PPP - Point to Point Protocol  
pRTT - Número de pacotes enviados no intervalo RTT  
PSO - Particle Swarm Optimization  
PT - Payload Type  
QoS - Quality of Service  
RAB - Radio Access Bearer  
RABM - Radio Access Bearer Manager  
RANAP - Radio Access Network Application Protocol  
RB - Radio Bearer  
RLC - Radio Link Control  
RMA - Rate Matching Attribute  
RNC - Radio Network Control  
ROHC - Robust Header Compression  
RR - Radio Resource  
RRC - Radio Resource Control  
RTCP - Real Time Control Protocol  
RTP - Real Time Transport Protocol  
RTPC - Rede de Telefonia Pública Comutada  
RTT - Round Trip Time  
SABP - Service Area Broadcast Protocol  
SCCP - Signaling Connection Control Part  
SCTP - Stream Control Transmission Protocol  
S-CSCF - Server CSCF  
SO - Second Order  
SF - Spreading Factor  
SGSN - Serving GPRS Support Node

SID - Silent Descriptor  
SIGCOMP - Signaling Compression  
SIP - Session Initiation Protocol  
SM - Session Management  
SN - Sequence Number  
SRB - Signaling Radio Bearer  
srma - Static Rate Matching Attribute  
SS - Supplementary Service  
SSRC - Synchronization Source  
TB - Transport Block  
TBS - Transport Block Set  
TC3 - Codificador Turbo de 1/3  
TE - Terminal Equipment  
TF - Transport Format  
TM - Transparent Mode (RLC)  
TOC - Table of Contents  
UDP - User Datagram Protocol  
UDVM - Universal Decompressor Virtual Machine  
UM - Unacknowledge Mode (RLC)  
UMTS - Universal Mobile Telecommunication Services  
UTRAN - UMTS Terrestrial Access Network  
VoIP - Voice over IP

## Notação Científica

$\Omega$	conjunto representativo dos comprimentos de pacotes.
$x_k$	um elemento de $\Omega$ .
$\underline{X}$	conjunto representativo dos comprimento de quadros.
$X_l$	um elemento de $\underline{X}$ .
$\alpha_k$	probabilidade de chegada do pacote de ordem $k$ .
$D(\underline{X})$	função representativa da perda total média de pacotes.
$F(W)$	função de distribuição de probabilidade discreta da variável $W$ .
$P_S(\varepsilon)$	probabilidade de erro de uma sequencia de bits equiprováveis.
$P_D(\varepsilon)$	probabilidade de erro de uma sequencia de bits duplicados.
erfc	função erro complementar.
$E_b$	energia média por bit.
$N_0$	o dobro da densidade espectral de potencia de ruído.
$N$	número de bits simples da sequencia antes do <i>rate matching</i> .
$\Delta N$	número de bits duplicados da sequencia antes do <i>rate matching</i> .
$P$	função probabilidade de erro.
$c_{ijk}$	coeficientes de ajuste da função $P$ .
$\underline{\sigma}^T$	vetor de restrições para a teoria de otimização do <i>rate matching</i> .
$\underline{\mu}, \underline{\lambda}, \underline{\eta}$	componentes de $\underline{\sigma}^T$ .
$\nabla f$	gradiente da função escalar $f$ .
$i \in \overline{1, M}$	$i$ é um número inteiro pertencente ao intervalo $1, \dots, M$ .
$\min_{\underline{x}} z$	valor de $\underline{x}$ que minimiza $z$ .