

# **UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**

**Instituto de Engenharia de Sistemas e Tecnologias da Informação**

**SÉRGIO FUGIVARA**

## **IMPLEMENTAÇÃO E APRIMORAMENTO DE UM SISTEMA DE TELEMEDIDAS PARA VEÍCULOS LANÇADORES DE SATÉLITES**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Itajubá, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. LUIZ EDIVAL DE SOUZA, Dr.

Co-orientador: JOSÉ CARLOS JULIANO DE ALMEIDA, Dr.

ITAJUBÁ

Estado de Minas Gerais – Brasil

Abril de 2005



Dissertação aprovada por banca examinadora em 05 de Abril de 2005, conferindo ao autor o título de *Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica*.

**Banca Examinadora:**

Orientador:	LUIZ EDIVAL DE SOUZA, Prof. Dr.	UNIFEI
Co-orientador:	JOSÉ CARLOS JULIANO DE ALMEIDA, Dr.	CTA-IEAv
	JOSEMIR COELHO SANTOS, Prof. Dr.	USP
	JOSÉ ANTÔNIO CORTEZ, Prof. Dr.	UNIFEI

ITAJUBÁ

Estado de Minas Gerais – Brasil  
Abril de 2005

Aos meus pais,

A Deus, por guiar o meu caminho e por mais esta graça.

Ao Prof. Dr. Luiz Edival de Souza, pelo apoio e entusiasmo com que conduziu a orientação desta dissertação.

Ao Dr. José Carlos Juliano de Almeida, do Instituto de Estudos Avançados (IEAv-CTA), meus sinceros respeitos e admiração por sua orientação ao longo de todos estes anos que temos trabalhado juntos na área espacial, e por sua inestimável contribuição nesta dissertação como instrutor, revisor e amigo.

Ao eng. Cláudio Roberto Perez Rodrigues, chefe da subdivisão de Sistemas Elétricos do Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE-CTA) pelo constante incentivo para a minha participação e continuidade no programa de mestrado e pelo interesse para que eu obtenha minha especialização profissional.

Ao eng. Carlos Alberto Moura Guedes Pinto, do Instituto de Aeronáutica e Espaço pelas valiosas sugestões, por dividir seus profundos conhecimentos na área de sistemas de aquisição e processamento de dados de telemetria e principalmente pela amizade e companheirismo.

Ao MSE. Josef Ettl, do German Aerospace Center (DLR-Moraba) pelo fornecimento da placa multifuncional, pelas longas e detalhadas explicações sobre a mesma, pela boa vontade, otimismo e entusiasmo na cooperação teuto-brasileira na área espacial.

Aos colegas da seção de telemetria do Instituto de Aeronáutica e Espaço, meus companheiros de campanhas de lançamentos de foguetes, pelo apoio, pela dedicação na realização de montagens e de ensaios na parte experimental.

Aos membros da banca examinadora pelas sugestões propostas.

---

# SUMÁRIO

<b>Dedicatória</b>	iii
<b>Agradecimentos</b>	iv
<b>Sumário</b>	v
<b>Resumo</b>	vii
<b>Abstract</b>	viii
<b>Índice de Figuras</b>	ix
<b>Índice de Tabelas</b>	xi
<b>Lista de Abreviaturas</b>	xii
<b>Lista de Símbolos</b>	xiii
<b>1. Introdução</b>	1
1.1. Sistema de Telemedidas	3
1.2. Apresentação do problema	6
1.3. Objetivo	8
1.4. Estrutura da Dissertação	9
<b>2. Modulação de Sinais</b>	10
2.1. Eficiência da Comunicação	10
2.2. Modulação FM/FM	11
2.2.1. Multiplexação por Divisão na Frequência	12
2.2.2. Espectro de Frequência FM	12
2.2.3. Método de Cálculo	18
2.2.3.1. Margem de Folga do Rádio-Enlace	21
2.2.3.2. Pré-ênfase e Dê-ênfase	22
2.2.3.3. Amplitude da Subportadora	24
2.2.3.4. Limiar de Discriminação	24
2.2.3.5. Tensão da Banda Básica	24
2.3. Modulação PCM/FM	26
2.3.1. Comparação entre Multiplexação FDM e TDM	27
2.3.2. Multiplexação por Divisão no Tempo	28
2.3.3. Modulação de Pulsos	30
2.3.4. Modulação por Pulsos Codificados	31
2.3.5. Quantização de Sinal	33
2.3.6. Composição da Palavra	36
2.3.7. Quadro de Canais de dados PCM	37
2.3.8. Método de Cálculo	38
2.3.8.1. Limiar de Discriminação	39
2.3.8.2. Tensão da Banda Básica	39
2.4. Considerações Finais	39
<b>3. Sistema de Aquisição e Codificação de Sinais</b>	42
3.1. Sistema de Telemedidas	42
3.1.1. Multiplexador Analógico FM	43
3.1.2. Codificador PCM Comercial	46
3.2. Composição do Quadro de Canais	47

3.3. Teorema da Amostragem e “Aliasing”	49
3.4. Filtragem Analógica.	51
3.5. Sub-comutação e Super-comutação	54
3.6. Quadro de Canais do Codificador PCM Comercial	59
3.7. Considerações Finais	63
<b>4. Sistema de Telemidas Proposto</b>	<b>64</b>
4.1 Configuração do Sistema de Telemidas Proposto	64
4.2. Quadro de canais para sinais de freqüência alta	69
4.3. Programação do Cartão Multifuncional	71
4.4 Considerações Finais	74
<b>5. Resultados</b>	<b>76</b>
5.1. Espectros das freqüências das bandas básicas	79
5.2. Sinal característico das bandas básicas FDM e TDM	81
5.3. Resultado comparativo	84
<b>6. Conclusão</b>	<b>97</b>
6.1. Trabalhos Futuros	99
<b>Apêndice 1</b>	<b>100</b>
<b>Apêndice 2</b>	<b>103</b>
<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>109</b>
<b>Anexo A</b>	<b>111</b>
<b>Anexo B</b>	<b>112</b>
<b>Anexo C</b>	<b>113</b>
<b>Anexo D</b>	<b>115</b>
<b>Anexo E</b>	<b>116</b>
<b>Anexo F</b>	<b>117</b>
<b>Anexo G</b>	<b>118</b>

---

## **RESUMO**

Esta dissertação de mestrado tem como objetivo principal propor a substituição do sistema de aquisição analógico de um Veículo Lançador de Satélites e otimizar a distribuição de centenas de dados de grandezas analógicas, tais como, temperatura, pressão, vibração, ondas sonoras e outros de estados digitais, de acordo com sua frequência. A aquisição e processamento digital de sinais de frequências baixas e altas para posterior transmissão através de um mesmo rádio enlace de telemetria embarcada têm como consequência uma grande quantidade de amostras de sinais de frequência baixa e poucas amostras dos sinais de frequência alta. A otimização na distribuição destes sinais permite agregar todos os sinais de frequência alta em um único sistema de aquisição de dados embarcados de baixo custo denominado de cartão multifuncional. O cartão multifuncional é programado para aquisição, processamento e codificação dos dados utilizando-se a técnica de Modulação por Pulsos Codificados (*PCM*). A utilização de uma única placa micro-controlada surge como uma opção para aquisição e processamento destes sinais de frequência alta a um baixo custo, com qualificação espacial e com resultado similar aos obtidos em sistemas de telemedidas comerciais.



---

## **ABSTRACT**

This master degree thesis has as main goal change the Satellite Launching Vehicle analog acquisition system and optimize the data distribution of a hundred analog signals, for example temperature, pressure, vibration, sound waves and other digital states, according to their frequencies. The acquisition and digital processing of low and high frequency signal aiming further transmission by the same telemetry radio link have as consequence a large quantity of low frequency signal samples and a small quantity for the high frequency signal samples. The signal distribution optimization allows to join all high frequency signals at only one low cost onboard data acquisition system known as multifunction card. This card is programmed to acquire all high frequency signals, for data processing and encoding in Pulse Code Modulation (PCM). This single low cost onboard space qualified microcontrolled card appears as an option for acquisitions and data processing of high frequency signals with similar performance as commercial telemetry systems.

---

## Índice de Figuras

1.1	VLS1-V01 na Plataforma de Lançamento	1
1.2	VLS1-V02 no início da ascensão	2
1.3	Antena de Recepção Banda S – Estação de Telemetria	3
1.4	Distribuição das informações no sistema atual	4
1.5	Teste das redes elétricas através da Telemetria	6
1.6	Distribuição das informações no sistema proposto	8
2.1	Diagrama em Blocos do sistema FM/FM	11
2.2	Espectro de frequência FM	14
2.3	Raias significativas para $\beta=5$	15
2.4	Diagrama Básico de um receptor de RF	19
2.5	Localização dos circuitos de pré-ênfase e de dê-ênfase	23
2.6	Curva de pré-ênfase e de dê-ênfase	23
2.7	Diagrama do sistema de telemedidas básico	26
2.8	Multiplexagem no tempo de dois sinais	27
2.9	FDM Canais de informação no tempo e o respectivo espectro	28
2.10	TDM Canais de informação no tempo e o respectivo espectro	28
2.11	Técnica de multiplexação por divisão no tempo	29
2.12	Modulação por Pulsos	30
2.13	Codificador PCM Básico	31
2.14	Sinal Codificado NRZ e Bi-fase-L	32
2.15	Conversão do sinal Analógico para o código digital de 2 bits	32
2.16	Sistema básico de codificação e decodificação PCM multicanais	33
2.17	Função característica de quantização	35
2.18	Característica entrada saída para um compressor logarítmico	36
2.19	Palavra de 8 bits	37
2.20	Quadro de canais de dados PCM	38
3.1	Distribuição de informações em relação as frequências máximas	42
3.2	Banco de Osciladores de Subportadoras	43
3.3	Diferenças básicas entre osciladores de subportadoras	44
3.4	Pré-ênfase da banda básica P	45
3.5	Banda básica FM e transmissor banda P	46
3.6	Codificador PCM	47
3.7	Quadro principal e secundários	48
3.8	Sinal de origem contínua	49
3.9	Trem de Dirac	49
3.10	Sinal discreto	49
3.11	Espectro periodizado do sinal discreto	50
3.12	Reconstituição do sinal	51
3.13	Função de transferência de um Filtro Passa-baixa real	52
3.14	Densidade espectral de potência normalizada do sinal PCM	54
3.15	Procedimento inicial para elaboração do quadro de canais	55
3.16	Minor frame e a taxa de sub-frame	55
3.17	Supercomutação de canais	55
3.18	Palavra de sincronismo	56
3.19	Subcomutação de canais	56

3.20	Super-sub-comutação de canais de informação	57
3.21	Palavra de identificação de sub-frame	57
3.22	Quadro de canais PCM	58
3.23	Representação simplificada do quadro de canais PCM	58
3.24	Transmissão serial do quadro de canais PCM	59
3.25	Quadro atual de canais do VLS - Codificador PCM-S1	60
3.26	Quadro atual de canais do VLS- Codificador PCM-S2	61
3.27	Sistema de transmissão de informação do 4º estágio do VLS	62
3.28	Sistema de transmissão de informação do 3º estágio do VLS	63
4.1	Proposta do sistema de telemedidas para informações de frequência baixa	65
4.2	Proposta do sistema de telemedidas para informações de frequência alta	66
4.3	Configuração do sistema Micro-controlado Multifuncional para sinais de vibração	67
4.4	Sistema PCM micro-controlado Multifuncional	67
4.5	Diagrama em blocos do sistema micro-controlado Multifuncional	68
4.6	Quadro de canais Proposto - sistema micro-controlado Multifuncional	70
4.7	Método de programação do codificador PCM	71
4.8	Programa principal – estruturação dos quadros de canais	73
4.9	Rotina de interrupção para transmissão dos quadros de canais	74
5.1	Diagrama de conexão dos sub-sistemas de telemedidas	76
5.2	Equipamentos de bordo da banda básica de telemetria	77
5.3	Sistema de aquisição e gravação digital	78
5.4	Processamento e redução de dados	78
5.5	Gravador Magnético	79
5.6	Espectro de frequência da banda básica FDM	79
5.7	Espectro de frequência da banda básica FDM – OSC e OSP	80
5.8	Espectro de frequência da banda básica TDM – Codificador PCM-S1	81
5.9	Espectro de frequência da banda básica TDM - Codificador PCM-S2	81
5.10	Espectro de frequência da banda básica TDM – Cartão Multifuncional	81
5.11	Sinal característico da banda básica FDM	82
5.12	Sinal característico da gravação da banda básica PCM-Bi-phase-L	82
5.13	Diagrama do olho do Codificador PCM-S1 e PCM-S2	83
5.14	Diagrama do olho do Cartão Multifuncional	83
5.15	Codificador PCM - 3º estágio (100Hz/ 250 mVrms)	87
5.16	Codificador PCM - 4º estágio (100Hz/ 250 mVrms)	87
5.17	Codificador PCM - CartãoMultifuncional (100Hz/ 250 mVrms)	88
5.18	Oscilador de subportadora (100 Hz/ 250 mVrms)	88
5.19	Codificador PCM - 3º estágio (500Hz/ 250 mVrms)	89
5.20	Codificador PCM - 4º estágio (500Hz/ 250 mVrms)	89
5.21	Codificador PCM - CartãoMultifuncional (500Hz/ 250 mVrms)	90
5.22	Oscilador de subportadora (500 Hz/ 250 mVrms)	90
5.23	Codificador PCM - 3º estágio (1000Hz/ 250 mVrms)	91
5.24	Codificador PCM - 4º estágio (1000Hz/ 250 mVrms)	91
5.25	Codificador PCM - CartãoMultifuncional (1000Hz/ 250 mVrms)	92
5.26	Oscilador de subportadora (1000Hz/ 250 mVrms)	92

---

## Índice de Tabelas

2.1	Valores dos Coeficientes $J_n$ com valores de $\beta$	16
2.2	Probabilidade de erro de bit x relação de potência Sinal/ruído	38
3.1	Palavras de Sincronismo de sub-quadro	48
3.2	Taxa de bits disponíveis para programação	48
3.3	Lista de medidas de telemetria	54
5.1	Arquivo de dados medidos x tempo	84
5.2	Frequência do sinal – Oscilador de subportadora	85
5.3	Frequência do sinal – Codificador PCM 3º estágio	86
5.4	Frequência do sinal – Codificador PCM 4º estágio	86
5.5	Frequência do sinal – Cartão Multifuncional	86
5.6	Sinal de entrada (sintetizador)	93
5.7	Sinal reconstituído – Multifunction Board	93
5.8	Sinal reconstituído – PCM 3º estágio	94
5.9	Sinal reconstituído – PCM 4º estágio	94
5.10	Sinal reconstituído – Oscilador de subportadora	95
5.11	Erro porcentual dos subsistemas	95
6.1	Custos dos sistemas de telemedidas	98

---

## Lista de Abreviaturas

<i>APDT</i>	=	Aquisição e Processamento de Dados de Telemetria
<i>CLA</i>	=	Centro de Lançamento de Alcântara – MA
<i>FDM</i>	=	Frequency Division Multiplexing Multiplexação por Divisão na Frequência
<i>FM</i>	=	Frequency Modulation Modulação de Frequência
<i>FM/FM</i>	=	Rádio Enlace de banda básica FM e transmissão FM
<i>IAE</i>	=	Instituto de Aeronáutica e Espaço
<i>PCM</i>	=	Pulse Code Modulation Modulação por Pulsos Codificados
<i>PCM/FM</i>	=	Rádio Enlace de banda básica PCM e transmissão FM
<i>VLS</i>	=	Veículo Lançador de Satélites
<i>A/D</i>	=	Conversor Analógico Digital
<i>AM-DSB</i>	=	Amplitude Modulation –Double SideBand
<i>AMX</i>	=	Amplificador Mixer
<i>BER</i>	=	Bit Error Ratio Probabilidade de Erro de Bits
<i>BLN-P</i>	=	Balun Banda P (Balanced Unbalanced)
<i>CAD</i>	=	Conversor Analógico Digital
<i>CAG</i>	=	Controle Automático de Ganho
<i>CH</i>	=	Canais de Informação
<i>FDM</i>	=	Frequency Division Multiplexing Multiplexação por Divisão na Frequência
<i>FI</i>	=	Frequência Intermediária
<i>IRIG</i>	=	Inter Range Instrumentation Group
<i>OSC</i>	=	Oscilador de Subportadora Banda Constante
<i>OSP</i>	=	Oscilador de Subportadora Banda Proporcional
<i>PAM</i>	=	Pulse Amplitude Modulation Modulação por Amplitude de Pulso
<i>PDF</i>	=	Probability Density Function Função Distribuição de Probabilidade uniforme
<i>PDM</i>	=	Pulse Duration Modulation Modulação por Duração de Pulso
<i>PWM</i>	=	Pulse Width Modulation Modulação por largura de Pulso
<i>RF</i>	=	Rádio Frequência
<i>SOM-P</i>	=	Somador de Subportadora – Banda P
<i>SFID</i>	=	SubFrame Identifier Identificador de sub-quadro
<i>S/H</i>	=	Sample and Hold
<i>SY</i>	=	Palavra de Sincronismo
<i>SNR</i>	=	Signal to Noise Ratio / Relação Sinal Ruído
<i>SNR<sub>D</sub></i>	=	Relação entre potência do sinal e a potência de ruído do trem de pulso digital demodulado
<i>SNR<sub>0</sub></i>	=	Relação entre a potência de sinal e a potência de ruído na saída do discriminador de subportadora (dB).

## Listas de Símbolos

A	= Amplitude de sinal
b	= Número de bits
B	= Banda de ruído equivalente (Hertz).
$B_c$	= Banda de passagem do filtro de FI do receptor de RF (Hz).
$B_S$	= Banda de passagem da subportadora na entrada do discriminador.
$\beta$	= índice de modulação
d	= Distância (quilômetros).
$\Delta$	= Passo de quantização ou resolução
$\Delta f$	= Desvio de frequência ou afastamento da frequência instantânea da portadora
$\Delta f_{ds}$	= Desvio de pico da frequência da subportadora (Hz).
$\Delta f_{dc}$	= Desvio de frequência da portadora de RF devido a subportadora (Hz)
$(\Delta f_{dc})_{rms}$	= Desvio rms de frequência da portadora de RF devido a subportadora (Hz)
$\Delta t$	= Período de tempo de conversão de uma amostra analógica
$\Delta w$	= Desvio de pico da portadora devido ao sinal modulador
$e_{(t)}$	= Portadora senoidal de amplitude unitária modulada em frequência por um único sinal
$E_m$	= Amplitude o sinal modulador
$f_{BR}$	= Taxa de bits (Bit Rate)
$f_{WR}$	= Taxa de palavras (Word Rate)
$f_{SFR}$	= Taxa do subframe (Subframe Rate)
$f_n$	= Amostras adquiridas com uma taxa de amostragem $f_s \geq 2 f_{max}$
$f_{max}$	= Frequência mais alta do espectro de f(t).
$f_s$	= Frequência de amostragem
$f_{s(\min)}$	= Frequência de amostragem mínima
$f_{Nyquist}$	= Taxa de Nyquist
$f(t)$	= Função amostra gerada por uma fonte de sinal
$f_{alias}$	= Frequência de dobramento
$f_A$	= Frequência do sinal presente na entrada do discriminador de subportadoras
$f_c$	= Frequência central da subportadora (Hz).
$f_{LR}$	= Frequência do sinal do oscilador local de recepção
$f_m$	= Frequência cíclica (máxima)
$f_{Nyquist}$	= Frequência de Nyquist
$f_p$	= Frequência da portadora de RF (kHz).
$G_T$	= Ganho da antena transmissora (dBi).
$G/T$	= Figura de Mérito da antena de recepção (dBi / Kelvin).
$I_k$	= Número de níveis de quantização
$J_n(\beta)$	= valor da função de Bessel
k	= Constante de Boltzmann ( $k = 1,38 \times 10^{-23}$ [joule/kelvin])
K B	= Constante de Boltzmann (K = -198,6 dBm / Kelvin Hz) multiplicada pela banda de ruído equivalente (B).
$K_m$	= Constante de modulação do transmissor (kHz / $V_{rms}$ ).

$L_C$	=	Perda de potência de RF entre a saída do transmissor e a entrada da antena (dB).
$L_P$	=	Perda de Propagação no espaço livre (dB).
$\mu$	=	Parâmetro selecionado para dar a característica de compressão desejada.
$N_{SF}$	=	Número de palavras por subframe.
$M_g$	=	Margem de folga
$Q$	=	Operador de quantização
$P$	=	Banda de frequências de RF que estão entre 215 MHz a 260 MHz
$P_T$	=	Potência do transmissor de RF (dBm).
$R$	=	“Range”
$ x $	=	Amplitude do sinal de entrada para compressão
$\bar{x}^2$	=	média quadrática da amplitude normalizada do sinal de informação na saída do discriminador.
$x_c(\tau)$	=	Sinal limitado em banda
$X_s(\omega)$	=	Transformada de Fourier de $x_s(t)$
$x(n)$	=	Amplitude Arbitrária
$x(t)$	=	Sinal temporal arbitrário
$x_L$	=	Nível de decisão
$\hat{x}_L$	=	Nível de quantização
$\omega_a$	=	Frequência de amostragem
$\omega_s$	=	frequência de amostragem
$ y $	=	Amplitude de saída comprimida
$V_o$	=	Nível de saída do receptor de telemetria
$V_s$	=	Tensão do sinal modulador ( $V_{rms}$ ) ou amplitude de saída de cada oscilador de Subportadora.