

5. Resultados

O objetivo deste capítulo é apresentar os resultados obtidos na otimização do sistema de telemetrias do veículo lançador de satélites.

Os resultados experimentais relativos à aquisição de um sinal senoidal pelos sistemas de telemetrias em banda básica *FDM* e *PCM* são apresentados a seguir. O sinal para análise foi obtido de um sintetizador de funções utilizado em ensaios para qualificação e aceitação de equipamentos de vôo. Este sintetizador forneceu os níveis de tensão e as frequências requeridas para ensaio.

Os sinais obtidos através da instrumentação de telemetria foram processados pelas duas técnicas de modulação. Os dados devidamente codificados e modulados foram registrados simultaneamente em um gravador de fita magnética e pelo sistema de aquisição e processamento de dados de telemetria, conforme ilustrado na figura 5.1.

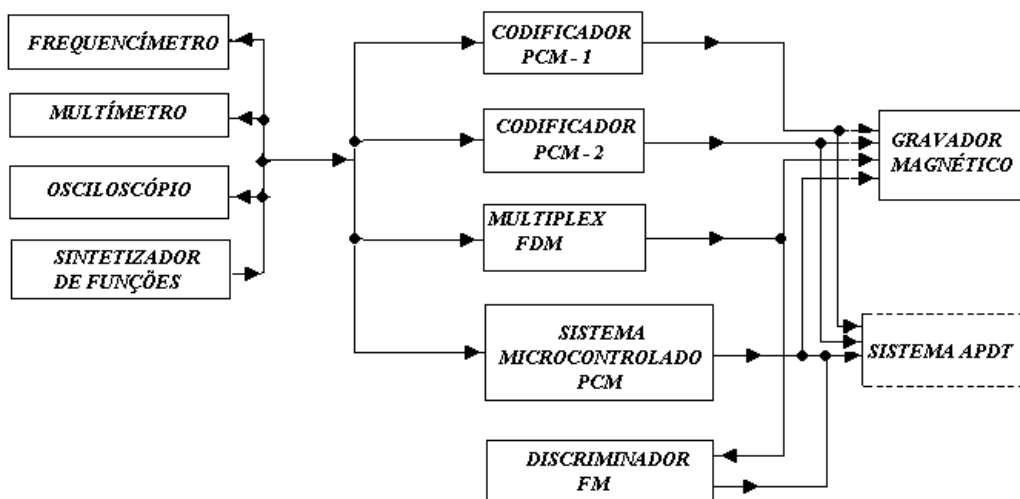


Figura 5.1: Diagrama de conexão dos sub-sistemas de telemetrias

Os dados foram reproduzidos e processados pelo sistema de Aquisição e Processamento de Dados de Telemetria (*APDT*), e disponibilizados através da Intranet para que os cálculos e a conversão em unidades de engenharia fossem realizados em outros computadores pessoais mais adequados, e finalmente analisados.

Esta seqüência de operações foi realizada utilizando os equipamentos de bordo:

- a) Osciladores de Sub-portadoras banda constante e proporcional
- b) Codificadores *PCM* comerciais
- c) Cartão Multifuncional
- d) Somador de sub-portadoras

e os equipamentos para processamento e redução de dados:

- a) Gravador Magnético
- b) Sistema integrado de aquisição e processamento de dados (Sincronizador de Bit / Decomutador PCM)
- c) Processamento e Redução de dados (Computadores clientes -PC)

Os equipamentos da banda básica de telemetria embarcada estão identificados na figura 5.2 e os equipamentos de solo (aquisição, processamento, gravação e redução de dados) estão ilustrados nas figuras 5.3, 5.4 e 5.5.

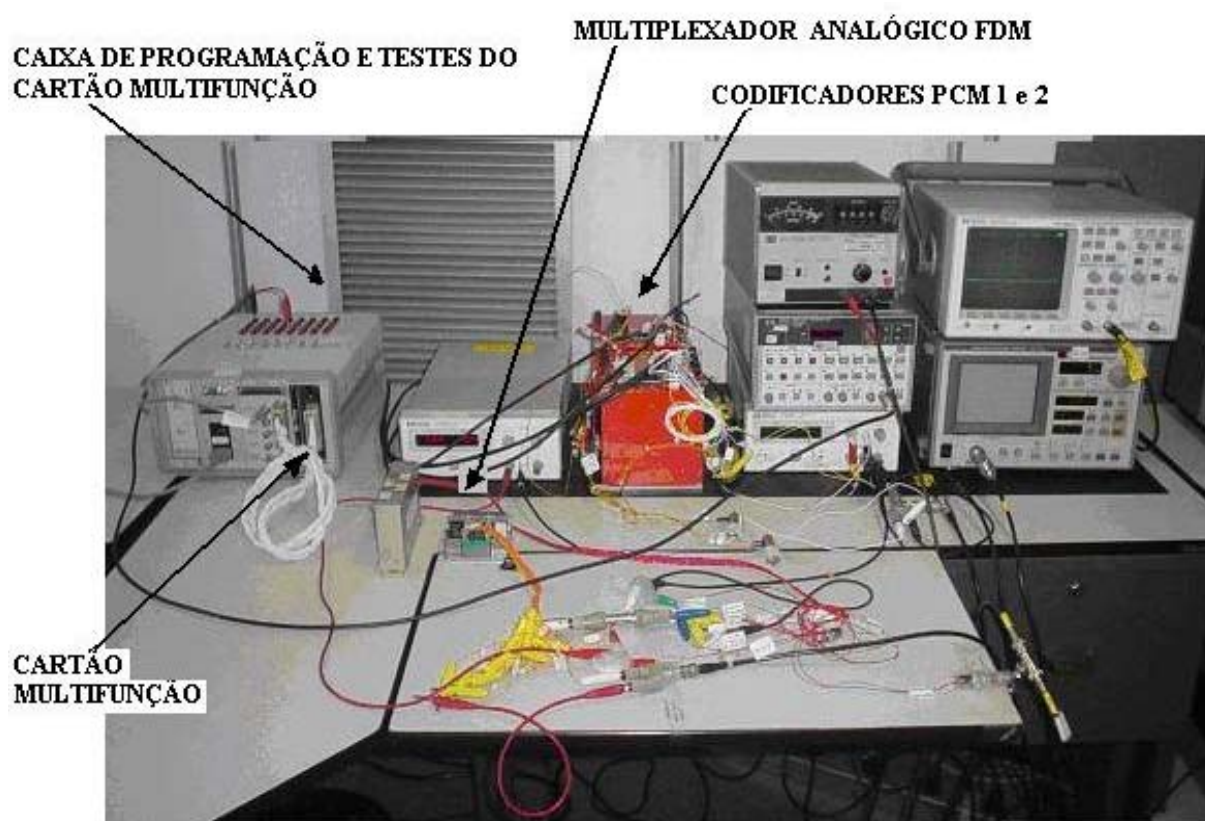


Figura 5.2: Equipamentos de bordo da Banda Básica de Telemetria

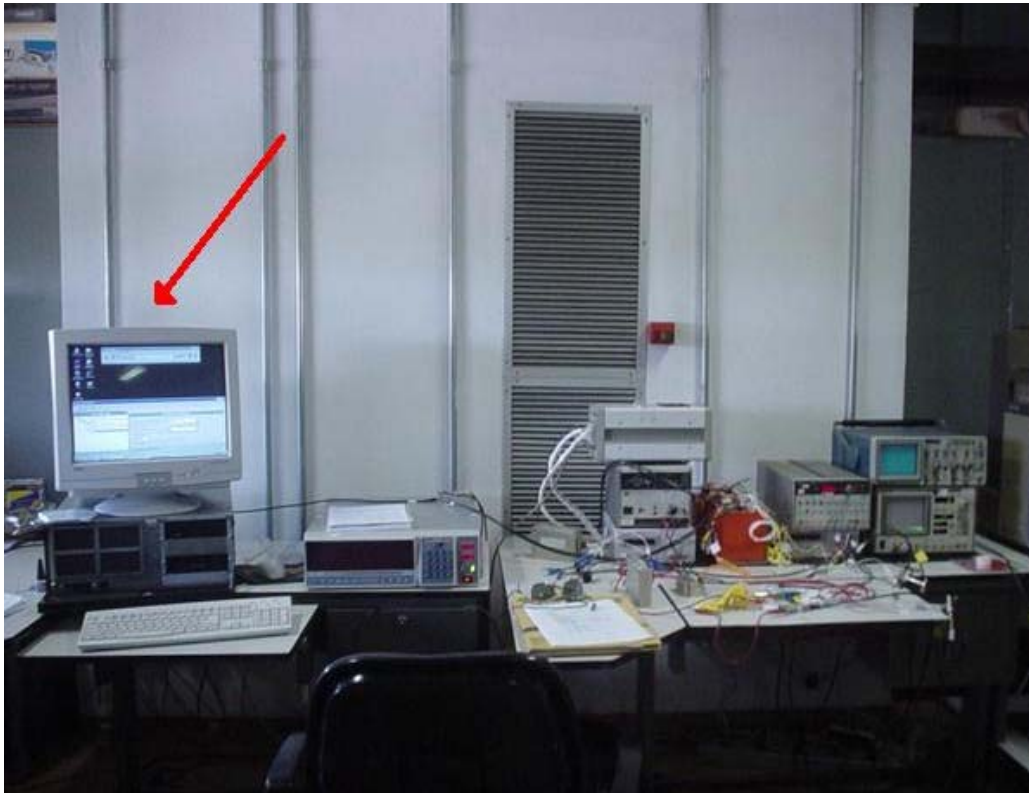


Figura 5.3: Sistema de Aquisição e Gravação Digital



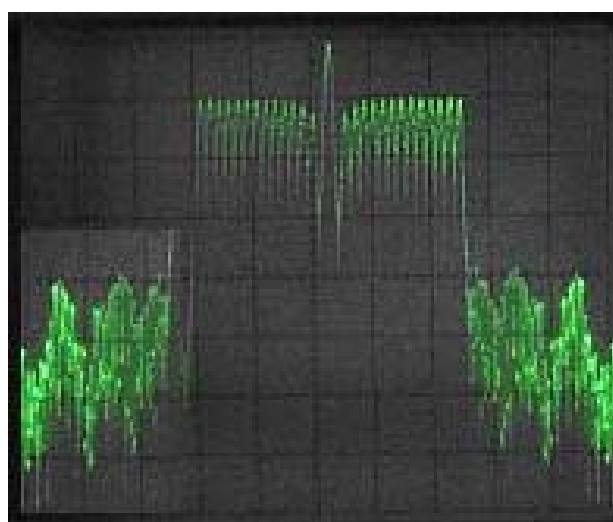
Figura 5.4: Processamento e Redução de Dados



Figura 5.5: Gravador Magnético

5.1. Espectros de freqüências das bandas básicas

Os espectros de freqüências das bandas básicas *FDM* são mostrados nas figura 5.6 e figura 5.7. Na figura 5.6 as raias laterais correspondem aos 13 sinais de subportadoras de banda constante, somados e pré-enfatizados.



SPAN: 0,5 MHz
10 dB/Div

Figura 5.6: Espectro de Freqüência da Banda Básica *FDM -OSC*

Na figura 5.7 a sub-portadora de banda proporcional aparece como a maior freqüência existente no espectro. Devido a este sinal ser o de maior freqüência, ele está pré-enfatizado e possui uma amplitude 20 dB acima das subportadoras de banda constante.

Observe que as subportadoras não estão moduladas e possuem uma tensão de entrada constante de 2,5 Volts, o que implica que todas as subportadoras estão sintonizadas nas suas respectivas frequências centrais (f_c), razão pela qual existe uma distância (Δf) maior entre a última raia de banda constante e a raia de banda proporcional.

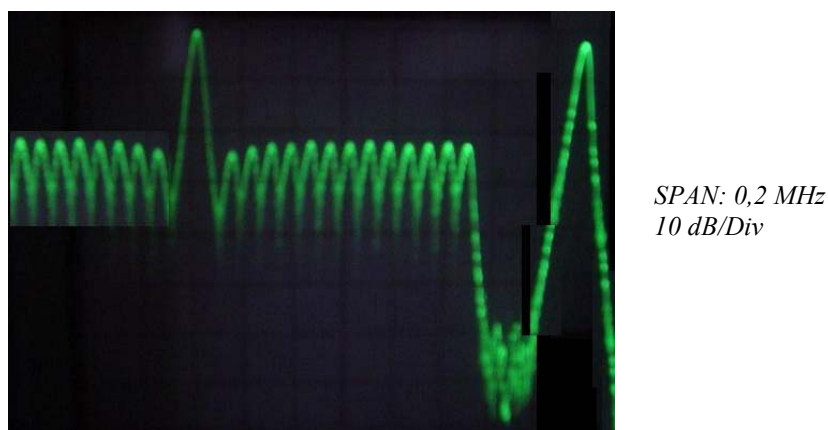


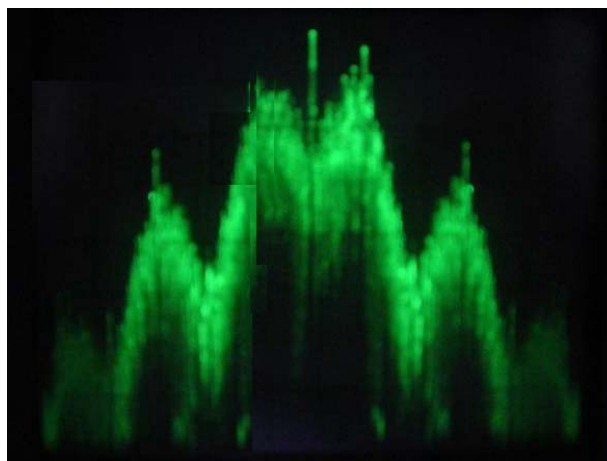
Figura 5.7: Espectro de Frequência da Banda Básica FDM –OSC e OSP

Esta diferença de frequência (Δf) diminui consideravelmente quando o sinal de entrada da subportadora de banda proporcional desloca a frequência do sinal de saída para a sua frequência inferior (f_l), ou deslocamento para a esquerda, e o último oscilador de subportadora de banda constante recebe um sinal modulador que desloca o sinal de saída para sua frequência superior (f_s), ou deslocamento para a direita.

Para evitar a intermodulação entre os canais adjacentes e preservar a faixa dinâmica de cada oscilador de subportadora, foram mantidos todos os critérios e recomendações do padrão *IRIG-106*.

Os espectros de frequências das bandas básicas *PCM* dos codificadores comerciais são mostrados nas figura 5.8 e figura 5.9 e a figura 5.10 mostra o espectro de frequência da banda básica do cartão multifuncional.

Observe que todos os codificadores foram programados com o código de saída *BI- ϕ -L* (Anexo F). O cartão multifuncional foi programado com uma taxa de bits de 1 *Mbps* (*SPAN=10 MHz*) e os codificadores *PCM* comerciais foram programados com 500 *Kbps* (*SPAN=5 MHz*).



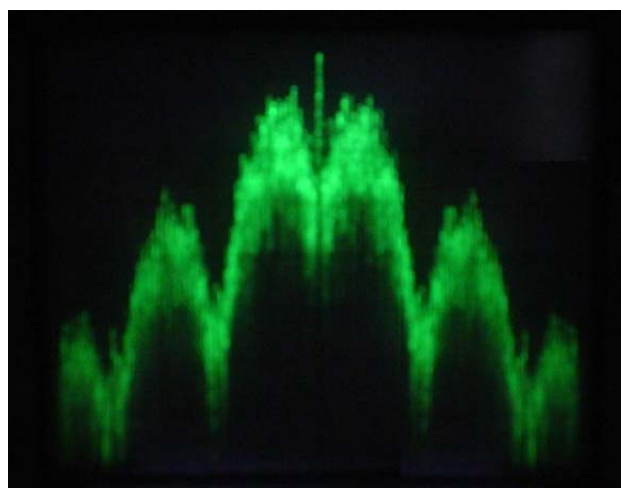
SPAN: 5 MHz
10 dB/Div

Figura 5.8: Espectro de Frequência da Banda Básica *TDM* – Codificador *PCM-S1*



SPAN: 5 MHz
10 dB/Div

Figura 5.9: Espectro de Frequência da Banda Básica *TDM* – Codificador *PCM-S2*



SPAN: 10 MHz
10 dB/Div

Figura 5.10: Espectro de Frequência da Banda Básica *TDM* – Cartão Multifuncional

5.2. Sinal característico das bandas básicas *FDM* e *TDM*

As informações que foram registradas em tempo real no processo de gravação magnética (banda básica *FDM* ou banda básica recondicionada *PCM*) reproduzem ou o sinal analógico *FDM* ou um sinal *PCM*. O sinal analógico *FDM* gravado é ilustrado na figura 5.7 e corresponde ao sinal *FDM* de 13 subportadoras de banda constante e um sinal de banda

proporcional somado. O sinal senoidal modulante na entrada dos osciladores foi mantido com amplitude e frequência constantes durante a gravação.

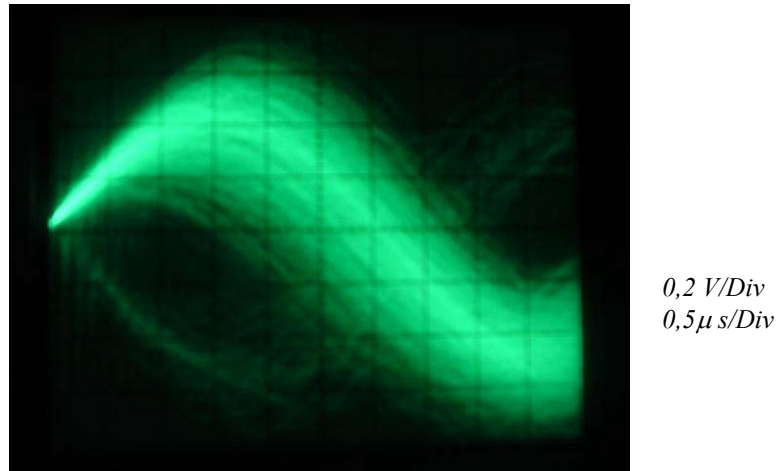


Figura 5.11: Sinal característico da Banda Básica FDM

A superposição da seqüência de “zeros” e “uns” (seqüência de bits) do sinal serial codificado em *PCM-Bi-fase-L* ($BI-\phi-L$) observado continuamente em um osciloscópio, resulta no diagrama do “olho” (*eye patterns*), ilustrado na figura 5.12. A observação deste sinal possibilita avaliar qualitativamente o sinal recebido, permitindo ao operador do gravador magnético em conjunto com o operador do receptor, controlar a qualidade do sinal que está sendo gravado.

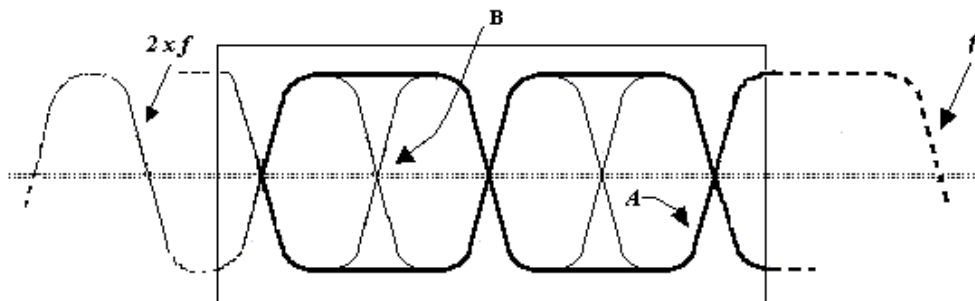


Figura 5.12: Sinal característico da Gravação da Banda Básica PCM-Bi-phase-L

O diagrama da figura 5.12 ilustra um “diagrama de olho” ideal. A avaliação qualitativa é verificada observando-se a coincidência em (A) entre os sinais de maior frequência ($2xf$) com a de menor frequência (f).

O ponto de cruzamento entre os sinais de maior frequência está coincidente com o eixo horizontal (B). Neste caso é considerado que o diagrama de olho está totalmente aberto, significando que o sinal recebido é de ótima qualidade para o processamento de dados.

A banda básica recondicionada *PCM* foi reproduzida e o respectivo diagrama do olho foi visualizado inserindo-se o sinal *PCM* na entrada vertical do osciloscópio e o sinal do “clock” reconstituído na entrada de sincronização externa do mesmo.

Os sinais *PCM Bi-fase-L* com uma cadência de 500 *kbps* (codificador *PCM-S1* e *PCM-S2*) e 1 *Mbps* (cartão multifuncional) foram gravados em uma mesma fita magnética a uma velocidade de 3048 *mm/s*, e os seus respectivos diagramas do olho são mostrados nas figuras 5.13 e 5.14. A velocidade de gravação e o respectivo tempo de duração de uma fita magnética podem ser obtidas no Apêndice 1.

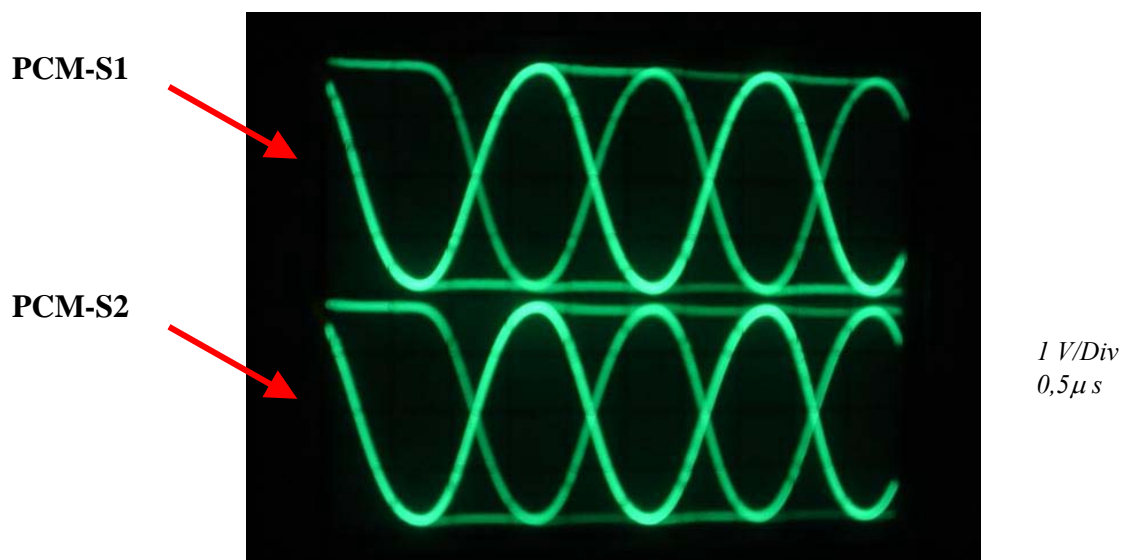


Figura 5.13: Diagrama do Olho Codificador *PCM-S1* e *PCM-S2*

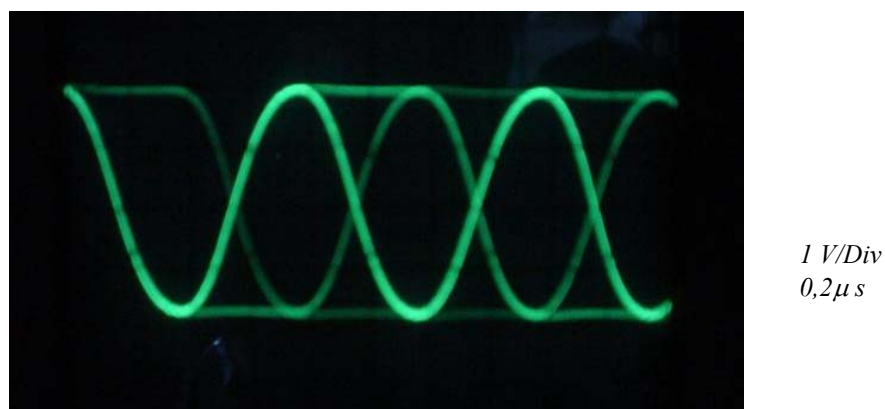


Figura 5.14: Diagrama do Olho - Cartão Multifuncional

O processamento dos dados após a missão de lançamento tem início com a reprodução (“*playback*”) do arquivo registrado em uma mídia magnética ou digital. Em ambos a informação dos dados está preservada, mas não estão ainda disponíveis para análise.

Os sinais analisados são registrados, processados e disponibilizados na sua forma discreta através de arquivos em formato *txt* contendo uma coluna com as informações de tempo de acordo com o padrão *IRIG-B* (Apêndice 2) e uma outra com os dados medidos conforme tabela 5.1. O código de tempo *IRIG-B* possui bits codificados em *BCD* distribuídos em: dias do ano, horas, minutos e segundos. Os dias do ano e as horas foram suprimidos através de método computacional, uma vez que não tem seus valores alterados no período observado.

Tabela 5.1: Arquivo de dados medidos x tempo

DADO [V]	TEMPO [SEG]
0.01363	2.056
0.02101	2.057
0.02838	2.058
0.03575	2.059
0.04312	2.060
0.05050	2.061
0.05787	2.062
0.06524	2.063
0.07262	2.064
0.07999	2.065
0.08736	2.066
0.09473	2.067
0.10211	2.068
0.10948	2.069
0.11685	2.070
0.12423	2.071
0.13160	2.072
0.13897	2.073
0.14634	2.074
0.15372	2.075
0.16109	2.076
0.16846	2.077
0.17584	2.078
0.18321	2.079
0.19058	2.080
0.19795	2.081
0.20533	2.082
0.21270	2.083
0.22007	2.084
0.22744	2.085
0.23482	2.086
0.24219	2.087
0.24956	2.088
0.25694	2.089
0.26431	2.090
0.27168	2.091
0.27905	2.092
0.28643	2.093
0.29380	2.094
0.30117	2.095

5.3. Resultado comparativo

O resultado comparativo deste estudo de configuração de sistemas de aquisição e processamento de sinais, utilizando as diferentes técnicas de modulação, é apresentado após submeter todos os sistemas a um mesmo sinal padrão. Utiliza-se um sinal senoidal padrão cuja amplitude *rms* assume os valores *250 mVolts*, *500 mVolts* e *1000 mVolts*. Para cada uma destas amplitudes, a frequência assume os valores de *100 Hz*, *500 Hz* e *1000 Hz*.

Para a análise visual, existem programas comerciais que podem ser utilizados para avaliação de dados arquivados, extração de resultados e geração de relatórios. Estes programas estão instalados em plataformas UNIX e Windows. Alguns destes programas de análises são desenvolvidos em linguagens de alto nível (MATLAB e Origin), enquanto outros estão em EXCEL e D-Plot (USAE Waterways Experiment Station – Structural Mechanics Division – Structure Laboratories). Todos incluem um variado conjunto de análises de sinais e ferramentas de estatísticas como a Transformada Rápida de Fourier (*FFT*) muito úteis na análise de sinais de vibração e utilizada nesta dissertação para determinação da frequência do sinal reconstituído à sua forma original a partir de um sinal amostrado.

O programa *D-Plot* de visualização gráfica *X-Y*, foi utilizado para visualizar e manipular os dados. Os dados manipulados através da *FFT* dos arquivos foram obtidos através da reprodução de uma fita magnética e estão mostrados nas figuras 5.15 a 5.26, onde se pode observar a frequência de um mesmo sinal senoidal ser recuperada nos diferentes sistemas de aquisição.

O resultado obtido através da *FFT* está representado nas tabelas 5.2, 5.3, 5.4 e 5.5. Os valores de frequência correspondem aos valores obtidos através do posicionamento automático do cursor no pico máximo dos gráficos. As variações de frequência de entrada não foram registradas automaticamente, apenas ajustadas de acordo com os valores de interesse, em razão da inexistência de um freqüencímetro com esta função nos laboratórios.

Observa-se que as frequências dos sinais reconstituídos estão muito próximas dos valores das frequências ajustadas e que o sintetizador utilizado é muito estável.

Tabela 5.2: Frequência do sinal – Oscilador de Subportadora

SISTEMA	Frequência/Amplitude Entrada		Frequência de Saída
	Hz	mV_{RMS}	Hz
Oscilador de Subportadora	100	250	99,7067
	100	500	99,70511
	100	1000	99,70671
	500	250	500,5494
	500	500	500,6267
	500	1000	500,7694
	1000	250	1001,465
	1000	500	1001,325
	1000	1000	1001,475

Tabela 5.3: Frequência do sinal - Codificador PCM 3º estágio

SISTEMA	Frequência/Amplitude Entrada		Frequência de Saída
	Hz	mV_{RMS}	Hz
Codificador PCM 3º Estágio	100	250	99,70667
	100	500	99,70416
	100	1000	99,70792
	500	250	500,5494
	500	500	500,6914
	500	1000	500,7340
	1000	250	1001,466
	1000	500	1002,745
	1000	1000	1002,465

Tabela 5.4: Frequência do sinal – Codificador PCM 4º estágio

SISTEMA	Frequência/Amplitude Entrada		Frequência de Saída
	Hz	mV_{RMS}	Hz
Codificador PCM 4º Estágio	100	250	99,70663
	100	500	99,7731
	100	1000	99,7781
	500	250	500,5494
	500	500	500,6491
	500	1000	500,6694
	1000	250	1001,465
	1000	500	1001,635
	1000	1000	1001,935

Tabela 5.5: Frequência do sinal - Cartão Multifuncional

SISTEMA	Frequência/Amplitude Entrada		Frequência de Saída
	Hz	mV_{RMS}	Hz
Cartão Multifuncional	100	250	99,70671
	100	500	99,7992
	100	1000	99,7631
	500	250	500,5494
	500	500	500,5697
	500	1000	500,6050
	1000	250	1001,4650
	1000	500	1002,0004
	1000	1000	1002,0464

As figuras 5.15 à 5.18 representam a frequência recuperada do sinal de entrada ajustado em 100 Hz com amplitude de 250 mV_{RMS} e foram obtidas através da função *FFT* disponível no programa *D-Plot*.

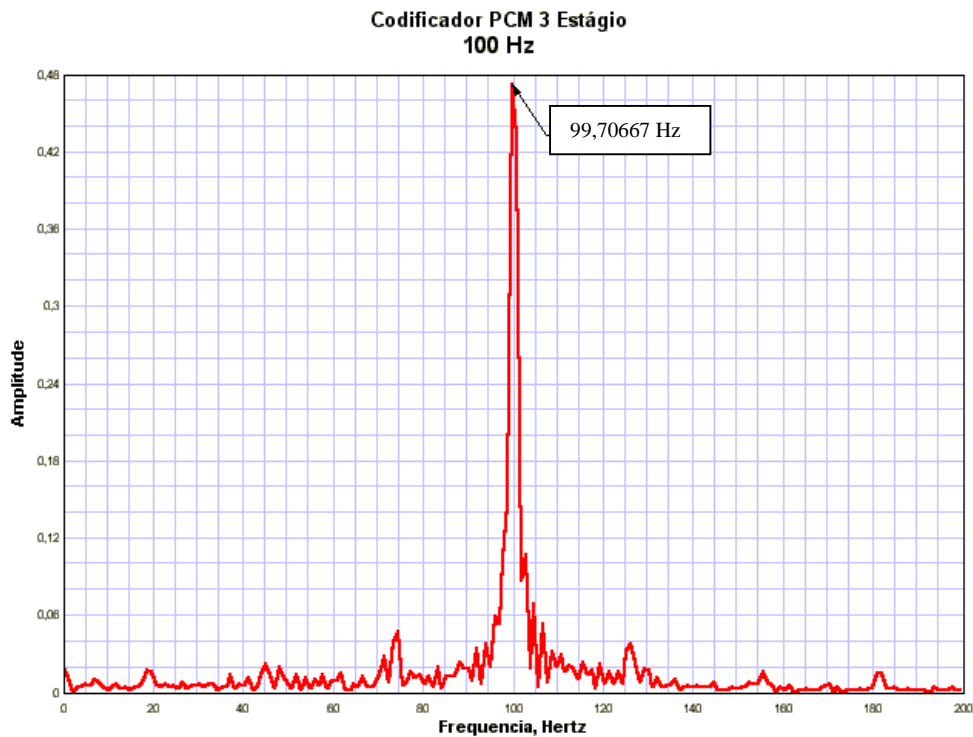


Figura 5.15: Codificador *PCM* -3º Estágio (100 Hz / 250 mVrms)

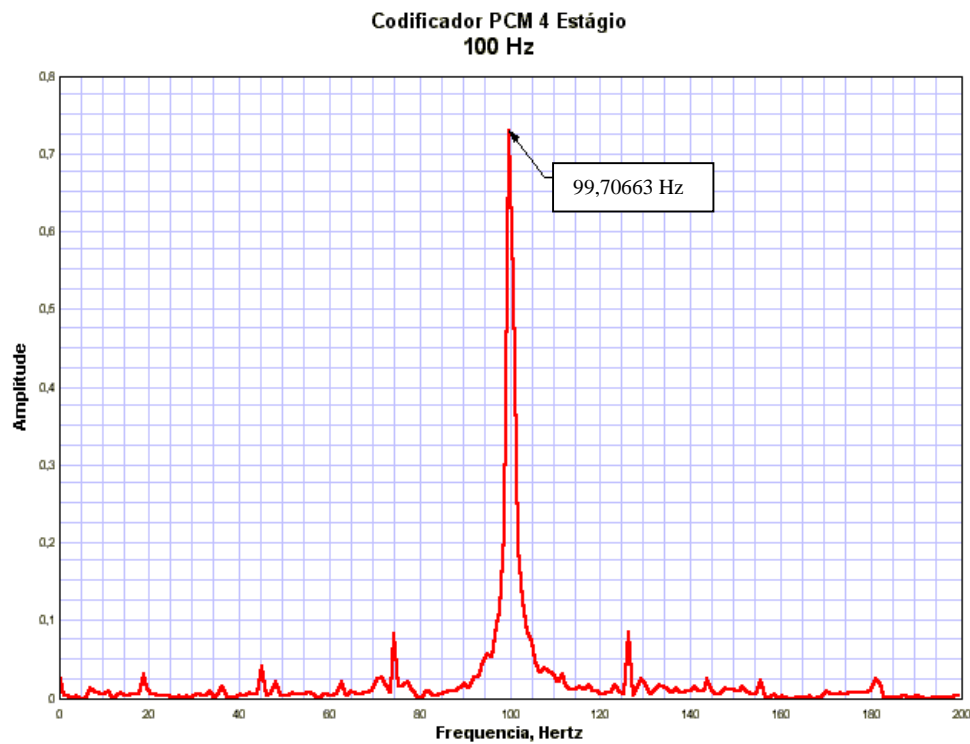


Figura 5.16: Codificador *PCM* -4º Estágio (100 Hz / 250 mVrms)

As frequências do sinal de saída obtidas nos diferentes sistemas de aquisição (codificadores *PCM* do 3º e 4º estágios, cartão multifuncional e oscilador de subportadora) estão muito próximas da frequência ajustada para o sinal de entrada (100 *Hz*). O erro percentual das frequências de saída recuperadas nos quatro sistemas de aquisição é menor que 0,30 % em relação a frequência de entrada ajustada em 100 *Hz*.

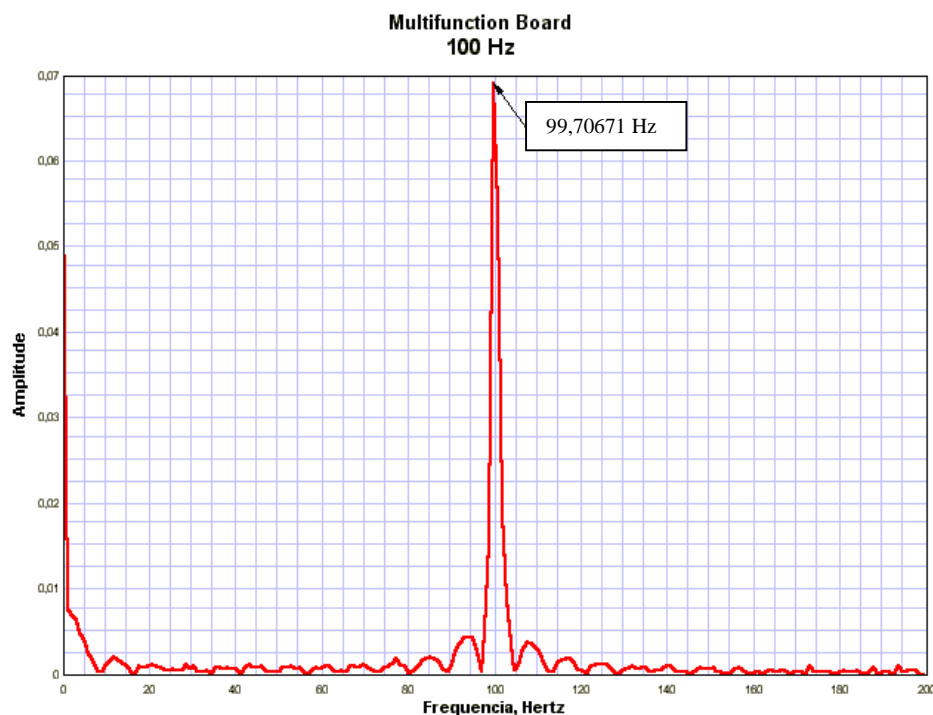


Figura 5.17: Cartão Multifuncional (100 Hz / 250 mVrms)

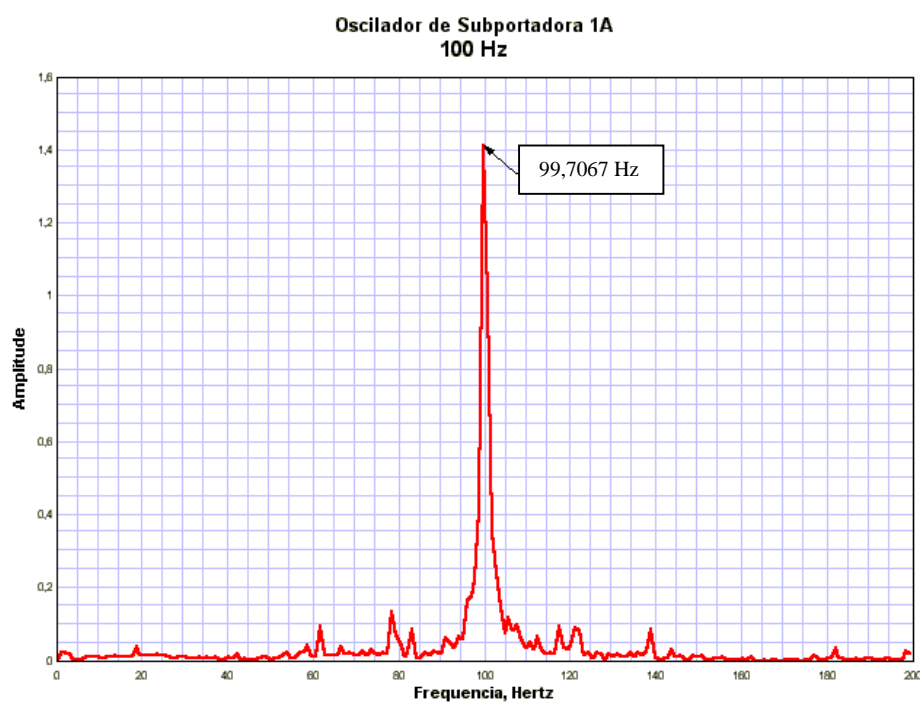


Figura 5.18: Oscilador de Subportadora (100 Hz / 250 mVrms)

As figuras 5.19 à 5.22 representam a frequência recuperada do sinal de entrada ajustado em 500 Hz com amplitude de 250 mV_{RMS} e foram obtidas através da função *FFT*.

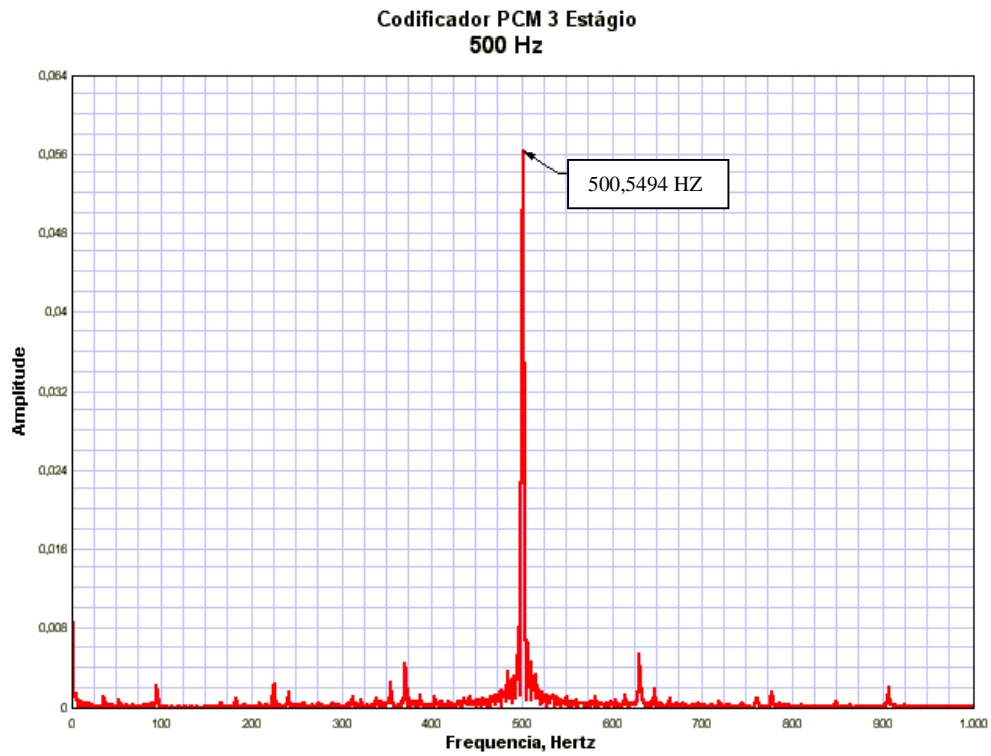


Figura 5.19: Codificador PCM -3º Estágio (500 Hz / 250 mVrms)

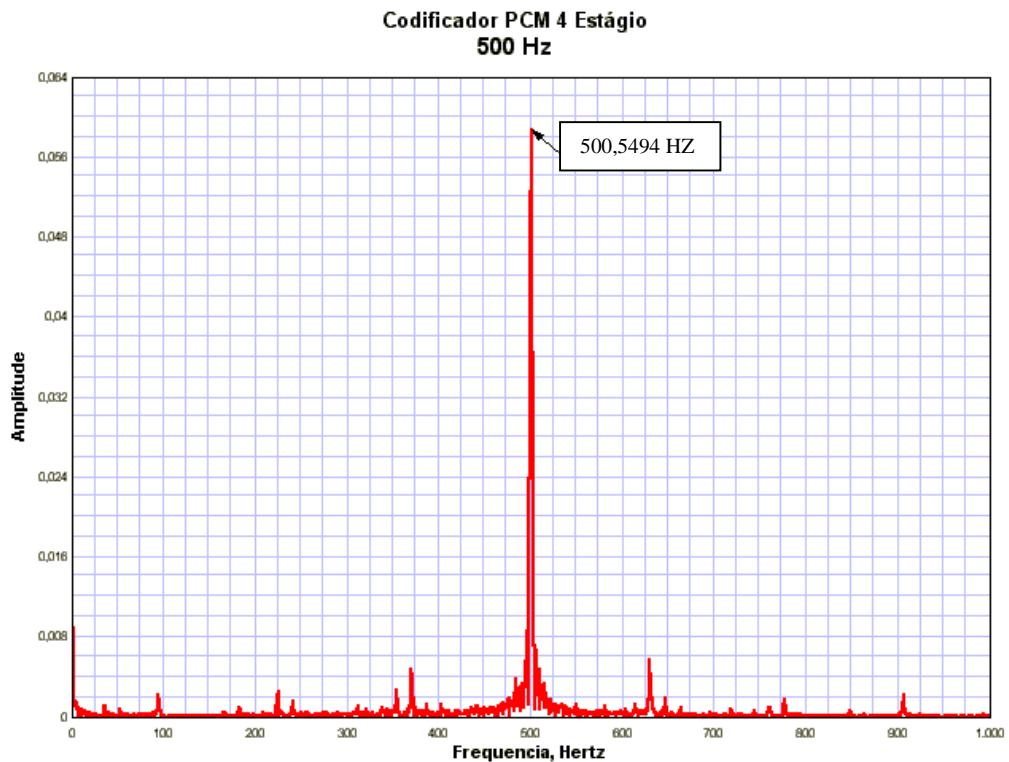


Figura 5.20: Codificador PCM -4º Estágio (500 Hz / 250 mVrms)

O erro porcentual da frequência de saída obtidos nos quatro sistemas de aquisição é menor que 0,12% em relação a frequência de entrada ajustada em 500Hz.

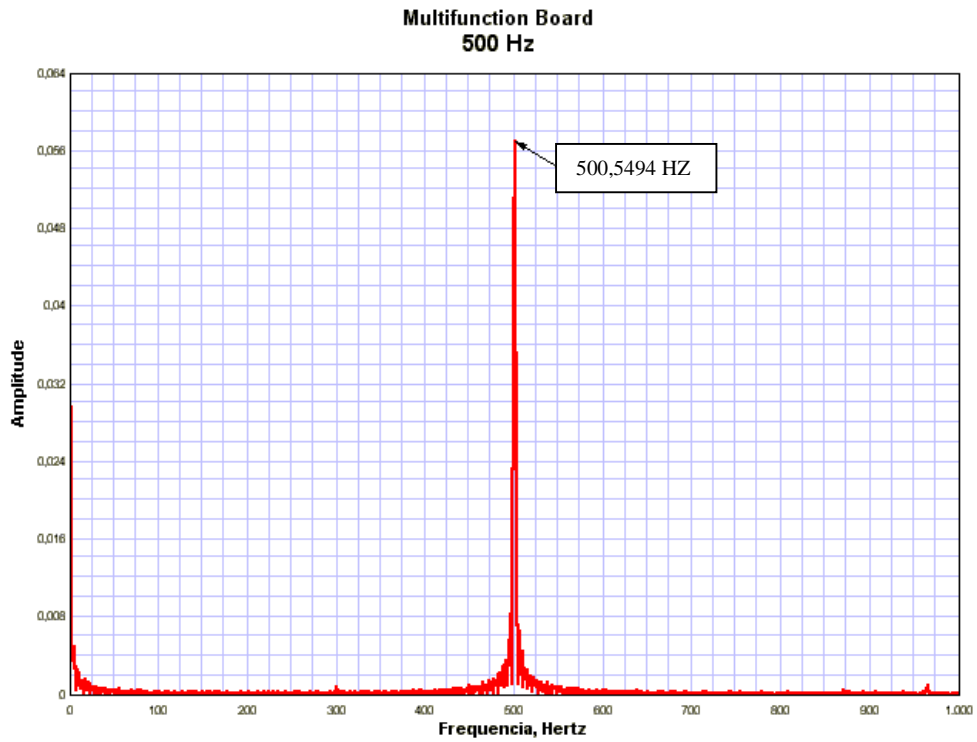


Figura 5.21: Cartão Multifunção (500 Hz / 250 mVrms)

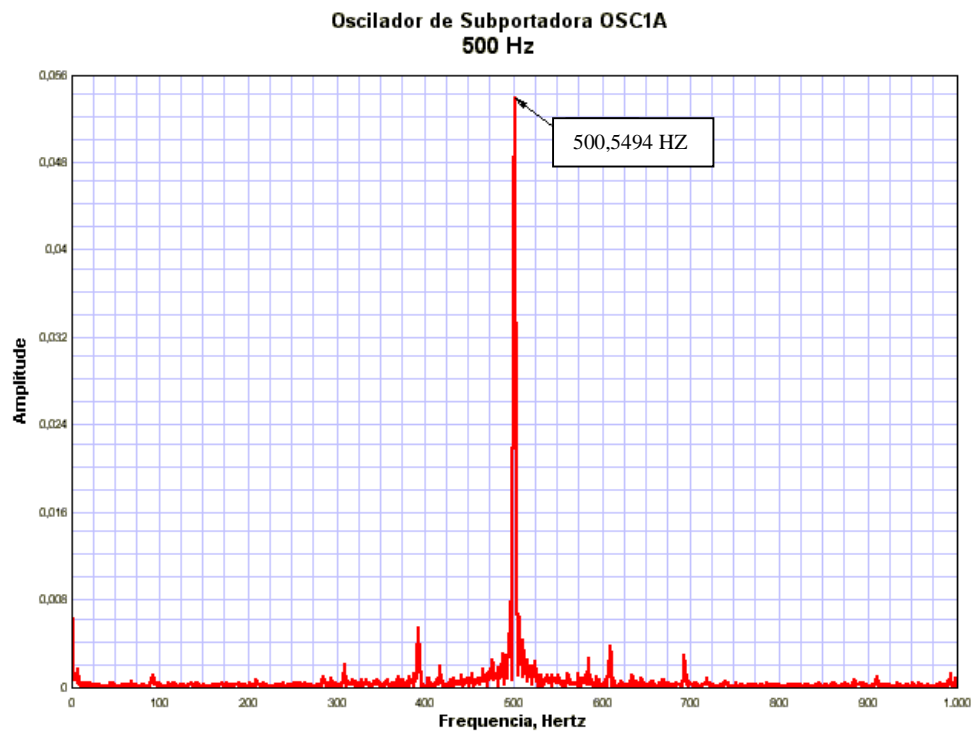


Figura 5.22: Oscilador de Subportadora (500 Hz / 250 mVrms)

As figuras 5.23 à 5.26 representam a frequência recuperada do sinal de entrada obtidas através da função *FFT* e ajustado em 1000 Hz com amplitude de 250 mV_{RMS}.

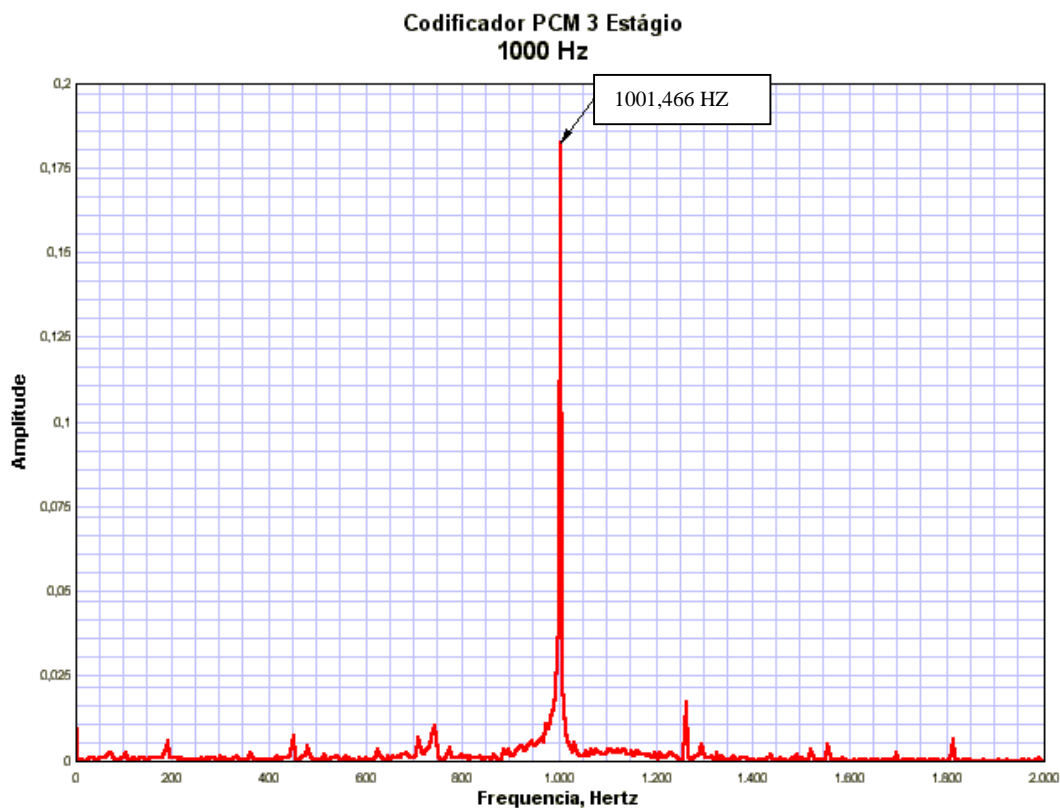


Figura 5.23: Codificador PCM -3º Estágio (1000 Hz / 250 mVrms)

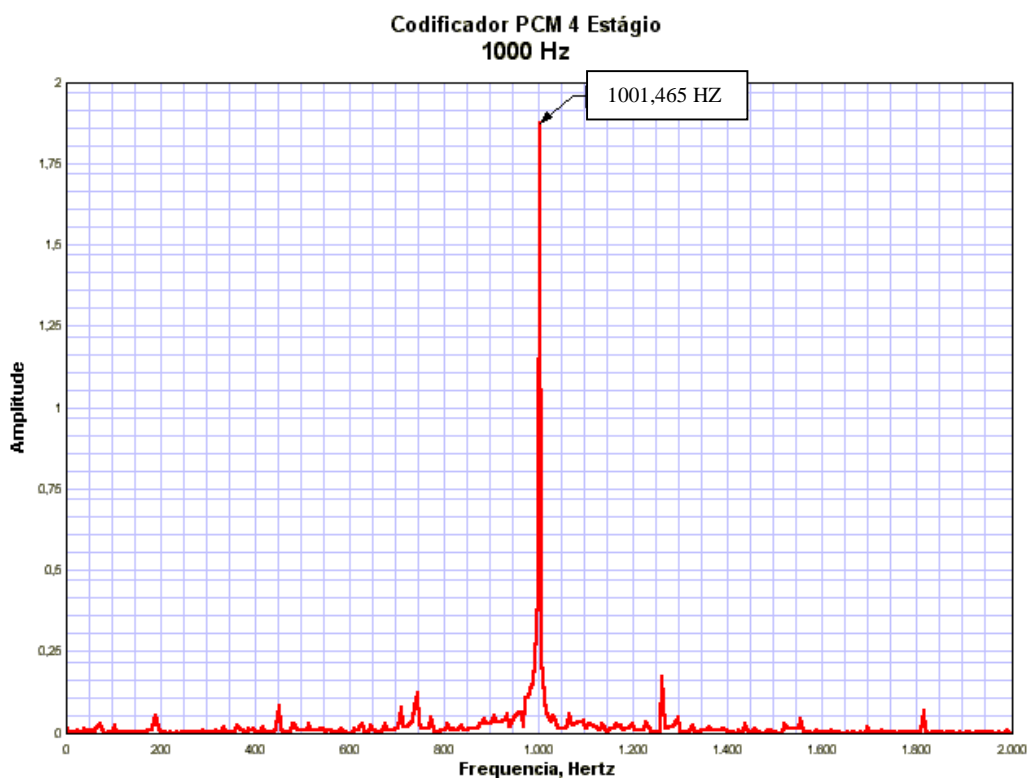


Figura 5.24: Codificador PCM -4º Estágio (1000 Hz / 250 mVrms)

O erro porcentual das frequências de saída obtidas nos quatro sistemas de aquisição é menor que 0,15% em relação a frequência de entrada ajustada em 1000Hz.

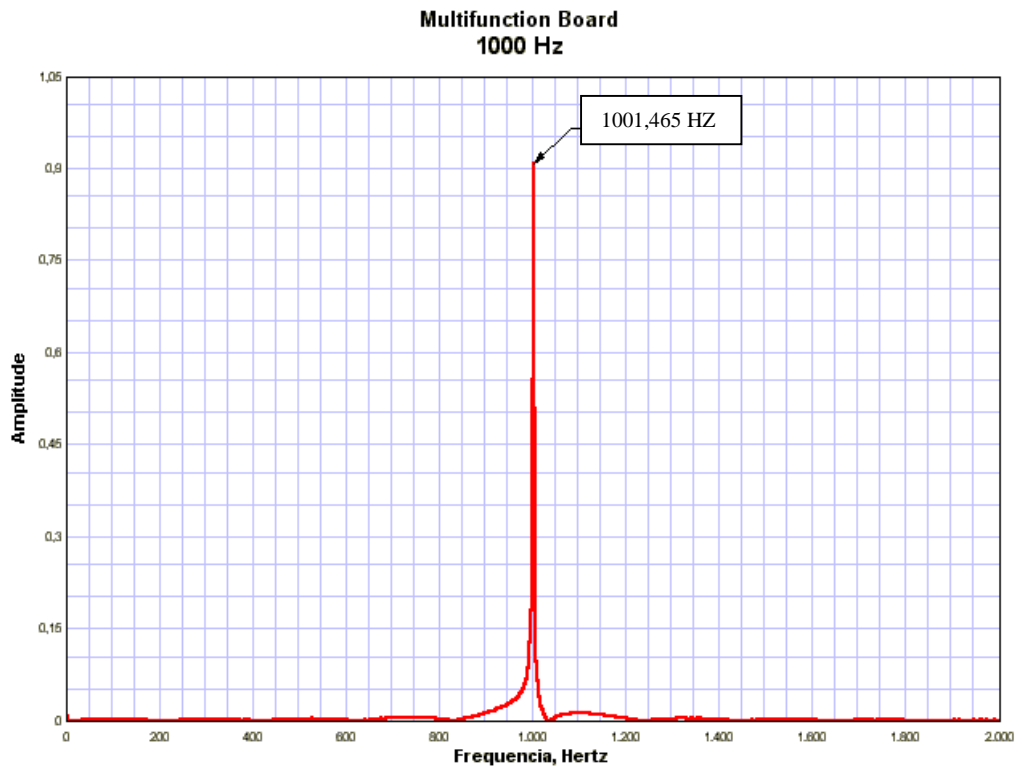


Figura 5.25: Cartão Multifuncional (1000 Hz / 250 mVrms)

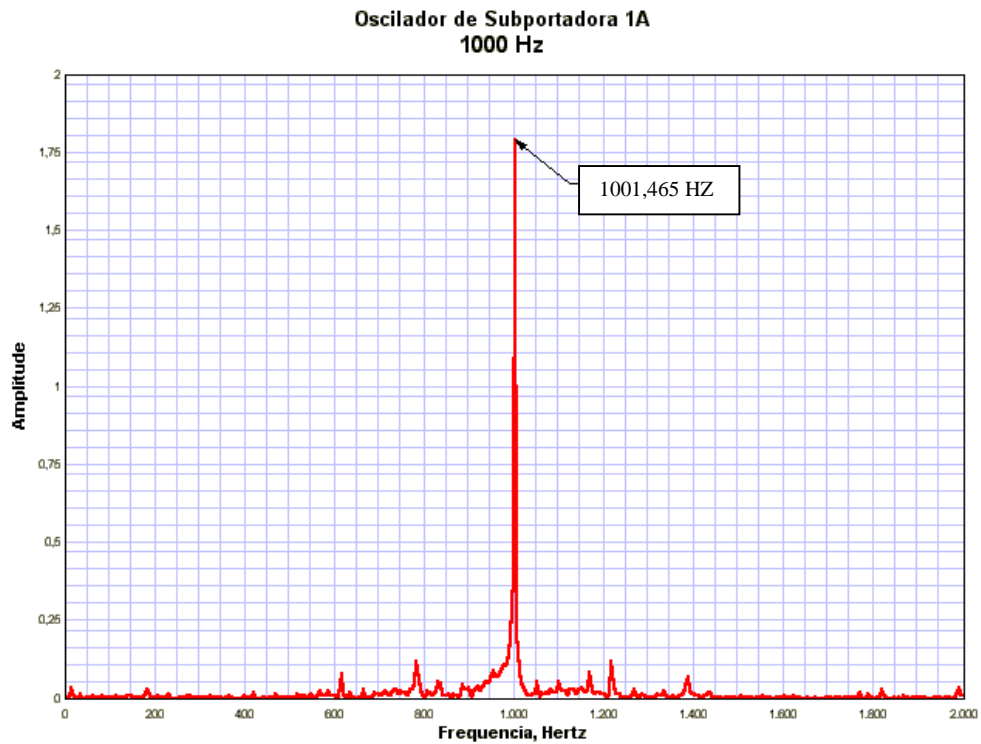


Figura 5.26: Oscilador de Subportadora (1000 Hz / 250 mVrms)

A amplitude do sinal padrão foi monitorada através de dois multímetros que foram programados para detectar o valor máximo, mínimo e médio do nível DC e do sinal AC (*rms*) e está mostrada na tabela 5.6.

Tabela 5.6: Sinal de Entrada (Sintetizador)

Frequência/Amplitude Entrada		Nível DC [V _{DC}]			Amplitude [V _{RMS}]		
		Min	Máx	Média	Min	Máx	Média
100 Hz	250 mV _{RMS}	2,5027	2,5157	2,509161	0,2504	0,2506	0,2505
100 Hz	500 mV _{RMS}	2,4998	2,5235	2,511522	0,5009	0,5010	0,5009
100 Hz	1000 V _{RMS}	2,5032	2,5509	2,527004	1,0006	1,0008	1,0007
500 Hz	250 mV _{RMS}	2,5038	2,5064	2,505109	0,2499	0,2499	0,2499
500 Hz	500 mV _{RMS}	2,5032	2,5081	2,505706	0,5005	0,5006	0,5005
500 Hz	1000 V _{RMS}	2,5199	2,5305	2,525265	1,0002	1,0003	1,0002
1000 Hz	250 mV _{RMS}	2,9446	2,4959	2,495124	0,2508	0,2509	0,2509
1000 Hz	500 mV _{RMS}	2,4950	2,4977	2,496450	0,4999	0,5000	0,5000
1000 Hz	1000 V _{RMS}	2,5216	2,5282	2,524729	1,0009	1,0011	1,0010

O sinal senoidal amostrado foi reconstituído a sua forma original através de um algoritmo computacional denominado “cubic spline”. Uma vez reconstituído o sinal amostrado, obtém-se os resultados mostrados nas tabelas 5.7, 5.8, 5.9 e 5.10.

Em cada linha destas tabelas os erros percentuais foram obtidos através da diferença entre os valores médios reconstituídos e a média do respectivo sinal monitorado na entrada, dividido pela média do sinal monitorado na entrada.

Tabela 5.7: Sinal reconstituído – Cartão Multifuncional

Frequência/Amplitude Entrada		Nível DC [V _{DC}]	ERRO %	Amplitude [V _{RMS}]	ERRO %
		Média		Média	
100 Hz	250 mV _{RMS}	2,5179	0,35	0,2518	0,52
100 Hz	500 mV _{RMS}	2,5195	0,32	0,5035	0,50
100 Hz	1000 mV _{RMS}	2,5345	0,30	1,0056	0,49
500 Hz	250 mV _{RMS}	2,5156	0,42	0,2516	0,67
500 Hz	500 mV _{RMS}	2,5164	0,43	0,5041	0,71
500 Hz	1000 mV _{RMS}	2,5371	0,47	1,0068	0,66
1000 Hz	250 mV _{RMS}	2,5078	0,51	0,2528	0,76
1000 Hz	500 mV _{RMS}	2,5096	0,53	0,5040	0,80
1000 Hz	1000 mV _{RMS}	2,5383	0,54	1,0084	0,74

Os erros percentuais foram obtidos através da diferença entre os valores médios recuperados (*DC* e *AC*) e os valores médios dos respectivos sinais de entrada (*DC* e *AC*) divididos pelos valores médios de entrada (*DC* e *AC*).

Tabela 5.8: Sinal reconstituído - PCM 3º Estágio

Frequência/Amplitude Entrada		Nível DC [V _{DC}]	ERRO %	Amplitude [V _{RMS}]	ERRO %
		Média		Média	
100 Hz	250 mV _{RMS}	2,5171	0,32	0,2492	0,50
100 Hz	500 mV _{RMS}	2,5203	0,35	0,4982	0,54
100 Hz	1000 mV _{RMS}	2,5345	0,30	0,9955	0,52
500 Hz	250 mV _{RMS}	2,5158	0,43	0,2484	0,60
500 Hz	500 mV _{RMS}	2,5154	0,39	0,4974	0,63
500 Hz	1000 mV _{RMS}	2,5376	0,49	0,9938	0,64
1000 Hz	250 mV _{RMS}	2,5076	0,50	0,2491	0,69
1000 Hz	500 mV _{RMS}	2,5094	0,52	0,4962	0,76
1000 Hz	1000 mV _{RMS}	2,5388	0,56	0,9937	0,73

Tabela 5.9: Sinal reconstituído - PCM 4º Estágio

Frequência/Amplitude Entrada		Nível DC [V _{DC}]	ERRO %	Amplitude [V _{RMS}]	ERRO %
		Média		Média	
100 Hz	250 mV _{RMS}	2,5176	0,34	0,2492	0,52
100 Hz	500 mV _{RMS}	2,5195	0,32	0,4982	0,55
100 Hz	1000 mV _{RMS}	2,5355	0,34	0,9955	0,52
500 Hz	250 mV _{RMS}	2,5153	0,41	0,2483	0,62
500 Hz	500 mV _{RMS}	2,5154	0,39	0,4973	0,65
500 Hz	1000 mV _{RMS}	2,5376	0,49	0,9940	0,62
1000 Hz	250 mV _{RMS}	2,5080	0,52	0,2491	0,71
1000 Hz	500 mV _{RMS}	2,5099	0,54	0,4961	0,78
1000 Hz	1000 mV _{RMS}	2,5396	0,59	0,9939	0,71

Tabela 5.10: Sinal reconstituído – Oscilador de Subportadora 1 A

Frequência/Amplitude Entrada		Amplitude Média [V_{RMS}]	ERRO %
100 Hz	250 mV_{RMS}	0,2530	0,98
100 Hz	500 mV_{RMS}	0,5053	0,87
100 Hz	1000 mV_{RMS}	1,0095	0,87
500 Hz	250 mV_{RMS}	0,2518	0,76
500 Hz	500 mV_{RMS}	0,5043	0,75
500 Hz	1000 mV_{RMS}	1,0077	0,74
1000 Hz	250 mV_{RMS}	0,2531	0,87
1000 Hz	500 mV_{RMS}	0,5043	0,86
1000 Hz	1000 mV_{RMS}	1,0109	0,98

O processo de discriminação do sistema analógico elimina o nível *DC* do sinal reconstituído. Por esta razão a tabela 5.10 não apresenta a coluna correspondente ao nível *DC* reconstituído.

A tabela 5.11 apresenta um resumo do erro porcentual de todos os sub-sistemas.

Tabela 5.11: Erro porcentual dos sub-sistemas

Frequência/ Amplitude Entrada		PCM 3º Estágio		PCM 4º Estágio		Multi-function Board		Oscilador de Subportadora 1 A
Hz	mV_{RMS}	Erro Nível DC [%]	Erro Nível AC [%]	Erro Nível DC [%]	Erro Nível AC [%]	Erro Nível DC[%]	Erro Nível AC [%]	Erro Nível AC [%]
100	250	0,32	0,50	0,34	0,52	0,35	0,52	0,98
100	500	0,35	0,54	0,32	0,55	0,32	0,50	0,87
100	1000	0,30	0,52	0,34	0,52	0,30	0,49	0,87
500	250	0,43	0,60	0,41	0,62	0,42	0,67	0,76
500	500	0,39	0,63	0,39	0,65	0,43	0,71	0,75
500	1000	0,49	0,64	0,49	0,62	0,47	0,66	0,74
1000	250	0,50	0,69	0,52	0,71	0,51	0,76	0,87
1000	500	0,52	0,76	0,54	0,78	0,53	0,80	0,86
1000	1000	0,56	0,73	0,59	0,71	0,54	0,74	0,98

A configuração atual utiliza o mesmo codificador *PCM* para aquisição de sinais tanto de frequência alta como de baixa. Com a nova proposta, que consiste na implementação de um codificador *PCM* em um cartão Multifuncional de baixo custo, obtém-se resultados muito próximos dos obtidos pelos codificadores *PCM* comerciais e muito melhores que os obtidos através do sistema analógico *FM*.

O capítulo 6 apresenta as conclusões e as perspectivas de evolução do trabalho.