

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**  
Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial

---

**DISSERTAÇÃO**  
apresentada à UTFPR  
para obtenção do título de

**MESTRE EM CIÊNCIAS**

por

**AMAURI AMORIN ASSEF**

---

**SISTEMA DE AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DE  
SINAIS DE ULTRA-SOM PARA CARACTERIZAÇÃO DE  
MEIOS BIOLÓGICOS E NÃO BIOLÓGICOS**

---

Banca Examinadora:

Presidente e Orientador:

**Prof. Dr. JOAQUIM MIGUEL MAIA**

**UTFPR**

Examinadores:

**Prof<sup>ª</sup>. Dra. ELISANGELA FERRETTI MANFFRA**

**PUCPR**

**Prof. Dr. PEDRO MIGUEL GEWEHR**

**UTFPR**

Curitiba, Fevereiro de 2006.

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.



**AMAURI AMORIN ASSEF**

**SISTEMA DE AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DE SINAIS DE ULTRA-SOM  
PARA CARACTERIZAÇÃO DE MEIOS BIOLÓGICOS E NÃO BIOLÓGICOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para a obtenção do título de “Mestre em Ciências” – Área de concentração: Engenharia Biomédica

Orientador: Prof. Dr. Joaquim Miguel Maia

Curitiba

2006

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca da UTFPR – Campus Curitiba

A844s Assef, Amauri Amorin  
“Sistema de Aquisição e Processamento de sinais de ultra-som para caracterização de meios biológicos e não biológicos / Amauri Amorin Assef. Curitiba. UTFPR, 2006 XIX, 129 p. : il.; 30 cm

Orientador: Prof. Dr. Joaquim Miguel Maia  
Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. Curitiba, 2006  
Bibliografia: f. 125-130

1. Processamento de sinais. 2. Ultra-som. 3. Telecomunicações – Banda larga. 4. Som – velocidade. 5. Propagação de ondas. 6. Processamento de dados – Software. I. Maia, Joaquim Miguel, orient. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. III Título.

CDD: 621.3822

## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Joaquim Miguel Maia, primeiramente por ter aceitado a minha idéia, pela orientação, pela amizade e principalmente pela confiança depositada no meu trabalho.

À instituição UTFPR pela permissão para utilização de seus equipamentos e laboratórios, além de ter me concedido a oportunidade de realizar este mestrado.

Ao Depto. de Engenharia Biomédica (DEB) da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação (FEEC) da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) por ter emprestado os transdutores de ultra-som utilizados durante o desenvolvimento do sistema.

À empresa Texas Instruments pelas amostras dos componentes cedidas.

À equipe completa de desenvolvimento da empresa NHS Sistemas Eletrônicos, que sempre supriu a minha ausência e em especial aos amigos Naldir Cardoso e Lucy Yoshida, pelo apoio e prontidão em atender meus pedidos.

Aos amigos Daniel e Gilmar Trevisan que me ajudaram nos momentos mais difíceis.

Aos meus irmãos Gilberto e Ernesto Amorin Assef que sempre estiveram ao meu lado, me ajudando em todos os momentos.

Aos meus pais Clarice Amorin Assef e Gilberto Assef que sempre me incentivavam, acreditando no meu potencial e a quem devo tudo que sou.

Dedico este trabalho a todos que são sem dúvida a razão da minha vida: minha esposa Roseane e meus filhos Guilherme e Felipe por todo incentivo, paciência e aceitação da minha ausência durante esta caminhada.

A Deus por mais esta conquista.



## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>ix</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>xiii</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....</b>	<b>xv</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>xix</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>xx</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 MOTIVAÇÕES.....	1
1.2 OBJETIVOS.....	3
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	4
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>5</b>
2.1 A EQUAÇÃO GERAL DAS ONDAS E SOLUÇÕES .....	5
2.2 IMPEDÂNCIA ACÚSTICA E INTENSIDADE DA ONDA .....	9
2.3 REFLEXÃO E REFRAÇÃO DE ONDAS EM SUPERFÍCIES PLANAS .....	11
2.4 TRANSDUTOR .....	13
2.5 MÉTODOS PARA CARACTERIZAÇÃO DE MEIOS BIOLÓGICOS ATRAVÉS DA TÉCNICA DE ULTRA-SOM .....	13
2.5.1 Método pulso-eco .....	14
2.5.2 Método transmissão-recepção .....	16
2.6 ATENUAÇÃO .....	17
2.6.1 Atenuação em Banda Larga - BUA.....	19
2.7 VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS ULTRA-SÔNICAS.....	21
2.7.1 Técnica para cálculo utilizando o envelope do sinal ultra-sônico.....	23
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>27</b>
3.1 UNIDADE DE CONTROLE DIGITAL.....	30
3.1.1 Placa de desenvolvimento DSK TMS320VC5416 .....	30
3.1.1.1 Processador Digital de Sinais TMS320VC5416.....	32
3.1.1.2 Memória de programa .....	33
3.1.1.3 Memória de dados .....	34
3.1.1.4 Endereçamento de dispositivos de entrada e saída.....	36
3.1.2 Placa Interface_V1 .....	36
3.1.2.1 Lógica de Apoio e Controle .....	37

3.1.2.2	Chaves de entrada e LCD.....	41
3.1.2.3	Sinalização dos LEDs e <i>buzzer</i> .....	43
3.2	UNIDADE DE TRANSMISSÃO .....	43
3.2.1	Circuito de disparo .....	45
3.2.2	Conversor de nível lógico e <i>driver</i> de corrente .....	46
3.2.3	Circuito de potência .....	47
3.2.4	Circuito de corte .....	49
3.3	UNIDADE DE RECEPÇÃO .....	50
3.3.1	Circuito de proteção da unidade de recepção.....	52
3.3.2	Circuito conversor D/A .....	53
3.3.3	Circuito de amplificação com ganho variável.....	56
3.3.4	Circuito conversor A/D .....	57
3.3.5	Memória FIFO.....	60
3.4	PLACA DRIVER_V1 .....	61
3.5	FONTES DE ALIMENTAÇÃO .....	63
3.6	PROTÓTIPO DO <i>HARDWARE</i> DO SISTEMA.....	65
3.7	<i>FIRMWARE</i> DE CONTROLE DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO.....	66
3.7.1	Comando “Mostrar Configuração” .....	69
3.7.2	Comando “Alterar Configuração” .....	70
3.7.2.3	Parâmetro “Número de repetições” .....	75
3.7.2.4	Parâmetro “Atenuação do VCA” .....	75
3.7.2.5	Parâmetro “Atraso de recepção” .....	76
3.7.2.6	Parâmetro “Modo de operação” .....	77
3.7.2.7	Parâmetro “Área de mapeamento” .....	78
3.7.2.8	Parâmetro “Resolução do mapeamento” .....	79
3.7.3	Comando “Posicionar Motor” .....	79
3.7.3.1	Parâmetro “Seleciona motor” .....	81
3.7.3.2	Parâmetro “Sentido motor” .....	81
3.7.3.3	Parâmetro “Distância” .....	81
3.7.3.4	Comando “Iniciar motor” .....	82
3.7.4	Comando “Iniciar Teste” .....	83
3.7.5	Comando “Iniciar Varredura” .....	85
3.8	TRANSFERÊNCIA DO <i>BUFFER</i> DE DADOS DIGITALIZADOS .....	88
3.9	<i>SOFTWARES</i> DE PROCESSAMENTO E ANÁLISE DOS DADOS.....	91

3.10	EQUIPAMENTOS E MATERIAIS UTILIZADOS NOS TESTES.....	93
<b>4</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>97</b>
4.1	Telas do LCD para apresentação de informações do sistema .....	97
4.2	Caracterização do <i>hardware</i> do sistema.....	99
4.3	Análise de desempenho do sistema.....	103
4.3.1	Resultados dos testes de velocidade.....	105
4.3.2	Resultados dos testes de atenuação .....	109
4.3.3	Resultados dos testes de atenuação em banda larga (BUA).....	110
<b>5</b>	<b>DISCUSSÃO E CONCLUSÕES.....</b>	<b>113</b>
5.1	ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	113
5.2	CONCLUSÕES.....	115
5.3	TRABALHOS FUTUROS.....	115
	<b>APÊNDICE A – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DA PLACA INTERFACE_V1.....</b>	<b>117</b>
	<b>APÊNDICE B – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DA PLACA FONTE_V1.....</b>	<b>119</b>
	<b>APÊNDICE C – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DA PLACA DE +200V .....</b>	<b>120</b>
	<b>APÊNDICE D – PROGRAMAÇÃO DO <i>SOFTWARE</i> MATLAB PARA O PROCESSAMENTO E ANÁLISE DO BUA.....</b>	<b>121</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>125</b>



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ondas de pressão em função da distância $z$ ; (a) em $t = 0$ ; (b) em $t = \Delta t$ . ....	8
Figura 2 – Comportamento da onda que incide na interface entre os meios 1 e 2, considerando $c_1 < c_2$ e, portanto $\theta_1 < \theta_t$ .....	11
Figura 3 – Representação da geração de ondas ultra-sônicas pelo método pulso-eco para determinação de parâmetros e caracterização de diferentes meios. ....	15
Figura 4 – Representação da geração de ondas ultra-sônicas pelo método transmissão-recepção para determinação de parâmetros e caracterização de diferentes meios. ....	16
Figura 5 – Sinal de referência (contínuo) e sinal transmitido através do material (tracejado). ....	19
Figura 6 – Espectro de frequências do sinal de referência (contínuo) e do sinal que se propagou através do material (tracejado). ....	20
Figura 7 – Atenuação em função da frequência. O coeficiente angular da curva de regressão é a Atenuação em Banda Larga (BUA) em dB/MHz.....	21
Figura 8 - Exemplo de sinal recebido por um transdutor de ultra-som mostrando o envelope, a Transformada de Hilbert e o ponto de máximo do mesmo. ....	25
Figura 9 - Cálculo do tempo de propagação das ondas ultra-sônicas no meio de referência e no material a ser analisado utilizando-se a técnica do envelope. A diferença entre os tempos de propagação ( $\Delta t$ ) pode ser utilizada para determinar a velocidade de propagação no material ( $V_m$ ) a ser analisado, conhecendo-se a dimensão ( $d$ ) do mesmo e a velocidade de propagação no meio de referência ( $V_r$ ). ....	26
Figura 10 - Diagrama em blocos do sistema de aquisição. ....	29
Figura 11 – Diagrama em blocos dos circuitos de controle do sistema. ....	30
Figura 12 – Diagrama em blocos da placa DSK TMS320VC5416. Adaptado de: SPECTRUM DIGITAL (2002). ....	31
Figura 13 - Diagrama em blocos funcional do DSP TMS320VC5416. Adaptado de: TEXAS INSTRUMENTS (2004). ....	32
Figura 14 – Mapa da memória de programa da placa DSK TMS320VC5416. Adaptado de: SPECTRUM DIGITAL (2002). ....	35
Figura 15 – Mapa da memória de dados da placa DSK TMS320VC5416. Adaptado de: SPECTRUM DIGITAL (2002). ....	35
Figura 16 – Mapa de endereços dos dispositivos periféricos de entrada e saída (E/S). ....	36
Figura 17 - Circuitos da lógica de apoio e controle. ....	37

Figura 18 - Diagrama de tempos do barramento do TMS30VC5416 para acesso a escrita em periférico. Adaptado de: TEXAS INSTRUMENTS (2004). .....	38
Figura 19 – (a) Circuitos das chaves de entrada tipo <i>push-bottom</i> ; (b) Circuito de conexão com o LCD 16x2 padrão Hitashi HD44780.....	41
Figura 20 – Circuito de acionamento dos LEDs e <i>buzzer</i> . .....	43
Figura 21 – Diagrama em blocos da unidade de transmissão de pulsos. ....	44
Figura 22 – Circuitos da unidade de transmissão do sistema.....	45
Figura 23 – Circuitos multivibradores monoestáveis utilizados na unidade de transmissão... 46	
Figura 24 – Circuitos <i>buffer</i> de tensão e <i>driver</i> de corrente para o acionamento do circuito de potência. ....	47
Figura 25 – Circuitos de potencia para a geração do pulso elétrico de +200 V e para seleção do modo de operação dos transdutores. ....	48
Figura 26 – Circuito de corte.....	50
Figura 27 – Diagrama em blocos da unidade de recepção. ....	51
Figura 28 - Circuitos da unidade de recepção do sistema. ....	52
Figura 29 – Circuito de proteção.....	53
Figura 30 – Circuito conversor D/A para ajuste do ganho do amplificador de recepção. ....	54
Figura 31 – Circuito amplificador da unidade de recepção .....	57
Figura 32 – Circuito do conversor A/D ADS5410 da unidade de recepção. ....	59
Figura 33 – Circuito da memória FIFO 74V245.....	61
Figura 34 - Circuitos da placa DRIVER_V1 para acionamento do motor de passo.....	62
Figura 35 – Circuitos reguladores de tensão de +3,3 V e +1,8 V da placa Interface_V1.....	64
Figura 36 - Foto do <i>hardware</i> do sistema de aquisição e processamento.....	65
Figura 37 - Foto do LCD conectado na parte frontal do sistema de aquisição. ....	65
Figura 38 – Diagrama da máquina de estados principal do sistema, representada pelo registro estado_lcd_1.....	66
Figura 39 – Fluxograma do <i>firmware</i> de controle do sistema.....	68
Figura 40 – Diagrama da máquina de estados principal do comando “Mostrar Configuração”. .....	69
Figura 41 – Fluxograma do comando “Mostrar Configuração”. ....	70
Figura 42 – Diagrama da máquina de estados principal do comando “Alterar Configuração”. .....	71
Figura 43 - Fluxograma do comando “Alterar Configuração”. ....	72
Figura 44 - Diagrama da máquina de estados principal do comando “Posicionar Motor”. ....	80

Figura 45 – Fluxograma do comando “Iniciar Teste”.....	84
Figura 46 – Fluxograma do comando “Iniciar Varredura”. .....	86
Figura 47 - Exemplo de mapeamento dos pontos do plano X-Y para área de 2 cm x 2 cm com resolução de 5 mm (total de 25 pontos). .....	87
Figura 48 – Tela principal do <i>software</i> Code Composer. ....	88
Figura 49 – Tela com inserção da ferramenta <i>probe point</i> na função “read_FIFO( )”. .....	89
Figura 50 – Tela da caixa <i>File I/O</i> para criação de arquivo de saída. ....	90
Figura 51 – Tela da caixa para conexão do <i>probe point</i> com o arquivo de saída. ....	91
Figura 52 – (a) Fluxograma para tratamento dos sinais para os métodos transmissão-recepção e pulso-eco; (b) fluxograma do processamento da curva de atenuação e cálculo do BUA. ....	92
Figura 53 – Transdutores de ultra-som da marca Panametrics, modelos V318, utilizados nos testes do sistema. ....	94
Figura 54 - Configuração utilizada para realizar os testes do sistema no modo de operação transmissão-recepção. ....	95
Figura 55 – Configuração utilizada para os testes do sistema no modo de operação pulso-eco. ....	95
Figura 56 – Conjunto suporte para posicionamento dos transdutores. ....	96
Figura 57 – Mensagens que podem ser apresentadas no LCD do sistema. ....	98
Figura 58 – Resposta em frequência da unidade de recepção do sistema. ....	99
Figura 59 – Sinais de saída do primeiro multivibrador (CH1) e do conversor 7407 (CH2)..	100
Figura 60 – Sinais de saída do primeiro (CH1) e segundo multivibrador monoestável (CH2). ....	100
Figura 61 - Sinais de saída do primeiro circuito multivibrador (CH1) e multiplexador 74HC4052 (CH2) do circuito de corte. ....	101
Figura 62 – Sinal de teste aplicado na entrada do circuito amplificador (CH1) e sinal de saída do circuito amplificador para ganho de 0 dB (CH2). ....	101
Figura 63 – Saídas do amplificador THS4503 com a aplicação de sinal de teste na entrada. ....	102
Figura 64 - Sinal de saída do primeiro circuito multivibrador (CH1) e pulso elétrico de alta amplitude gerado na unidade de transmissão (CH2). ....	102
Figura 65 – Sinal ultra-sônico captado pelo osciloscópio no transdutor receptor no modo transmissão-recepção à uma distância de 3,2 cm. ....	103
Figura 66 – (a) Sinal ultra-sônico digitalizado pelo sistema de aquisição; (b) ampliação do sinal anterior. ....	103

Figura 67 – (a) Sinal de referência e envelope do sinal; (b) ampliação do primeiro pico anterior. ....	104
Figura 68 – Espectro de frequência do sinal digitalizado: (a) em volts (V); (b) em decibel (dB).....	104
Figura 69 – (a) Sinal de referência (contínuo) e sinal transmitido através do acrílico (tracejado); (b) espectro de frequência do sinal de referência (contínuo) e do sinal que se propagou através do material (tracejado). ....	111
Figura 70 – (a) Curva de atenuação em função da frequência; (b) resultados e média das 10 aquisições para cálculo do BUA. ....	112

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Representação da velocidade das partículas e direção de propagação das ondas. ...	6
Tabela 2 – Soluções da equação unidimensional da onda para variável pressão.....	7
Tabela 3 – Propriedades acústicas típicas de vários meios (Adaptado de BRONZINO (1986) e YOUNG, (1990)). .....	10
Tabela 4 - Endereços das portas de entrada e saída de dados. ....	39
Tabela 5 – Descrição resumida das funções dos <i>bits</i> do <i>latch</i> 1. ....	39
Tabela 6 - Descrição resumida das funções dos <i>bits</i> do <i>latch</i> 2. ....	40
Tabela 7 - Descrição resumida das funções dos <i>bits</i> do <i>buffer</i> 1. ....	40
Tabela 8 – Descrição da pinagem do LCD .....	42
Tabela 9 - Modos de operação do sistema em relação aos estados dos sinais PULSO/ECO1 e PULSO/ECO2. ....	49
Tabela 10 – Ganhos de tensão da unidade de recepção que podem ser configurados para o sistema, valores equivalentes em hexadecimal e tensão de saída do conversor D/A.....	56
Tabela 11 – Descrição das mensagens do LCD para as 5 opções de comando do sistema. ....	67
Tabela 12 – Parâmetros do sistema e os registros das respectivas máquinas de estados.....	69
Tabela 13 – Parâmetros e configurações disponíveis no sistema.....	71
Tabela 14 – Configurações do parâmetro de taxa de amostragem.....	73
Tabela 15 – Configurações do parâmetro de taxa de repetição.....	74
Tabela 16 – Configurações do parâmetro de número de repetições. ....	75
Tabela 17 – Valores dos pesos equivalentes às configurações do parâmetro de atenuação do amplificador VCA810. ....	76
Tabela 18 – Configurações do parâmetro de atraso na recepção. ....	77
Tabela 19 – Configurações do parâmetro de modo de operação. ....	78
Tabela 20 – Configurações do parâmetro de área de mapeamento.....	78
Tabela 21 – Configurações do parâmetro de resolução de mapeamento. ....	79
Tabela 22 – Parâmetros do comando de posicionamento dos motores de passo. ....	80
Tabela 23 - Configurações do parâmetro de seleção de motor de passo.....	81
Tabela 24 - Configurações do parâmetro de sentido de movimento do motor de passo.....	81
Tabela 25 – Configurações do parâmetro de distância de deslocamento.....	82
Tabela 26 – Valores de configurações gravados no <i>buffer</i> de dados para análise. ....	85
Tabela 27 – Número de pontos de aquisição em relação à área e resolução.....	87
Tabela 28 – Nome dos arquivos de processamento e análise de dados. ....	93

Tabela 29 – Velocidade de propagação da onda ultra-sônica (m/s) medida pelo método transmissão/recepção, com distância de 2 cm, na água a 26 °C.....	105
Tabela 30 - Velocidade de propagação da onda ultra-sônica (m/s) medida pelo método transmissão/recepção, com distância de 3,2 cm, na água a 26,5 °C.....	105
Tabela 31 – Velocidade de propagação da onda ultra-sônica (m/s) medida pelo método transmissão/recepção, com distância de 6 cm, no leite a 23 °C. ....	106
Tabela 32 – Velocidade de propagação da onda ultra-sônica (m/s) medida pelo método transmissão/recepção, com distância de 2 cm, na pedra pome a 27 °C.....	106
Tabela 33 – Velocidade de propagação da onda ultra-sônica (m/s) medida pelo método transmissão/recepção, com distância de 3,2 cm, no alumínio a 26,5 °C.....	107
Tabela 34 – Velocidade de propagação da onda ultra-sônica (m/s) medida pelo método transmissão/recepção, com distância de 5 cm, no acrílico a 27 °C. ....	107
Tabela 35 – Velocidade de propagação da onda ultra-sônica (m/s) medida pelo método pulso-eco, com distância de 2 cm, na água a 26 °C.....	108
Tabela 36 – Velocidade de propagação da onda ultra-sônica (m/s) medida pelo método pulso-eco, com distância de 3,2 cm, na água a 26 °C.....	108
Tabela 37 – Velocidade de propagação da onda ultra-sônica (m/s) medida pelo método pulso-eco, com distância de 5 cm, no acrílico a 21°C.....	108
Tabela 38 – Atenuação da onda ultra-sônica (dB/cm) medida pelo método transmissão/recepção, com distância de 2 cm, na água a 26 °C.....	109
Tabela 39 – Atenuação da onda ultra-sônica (dB/cm) medida pelo método transmissão/recepção, com distância de 3,2 cm, na água a 26,5 °C.....	109
Tabela 40 – Atenuação da onda ultra-sônica (dB/cm) medida pelo método pulso-eco, com distância de 2 cm, na água a 26 °C.....	110
Tabela 41 – Atenuação da onda ultra-sônica (dB/cm) medida pelo método pulso-eco, com distância de 3,2 cm, na água a 26 °C.....	110
Tabela 42 – Resultado do cálculo do BUA no acrílico (dB/MHz). ....	112

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Amplitude
$\partial$	Derivada parcial
$\omega$	Frequência angular
$\alpha$	Coefficiente de atenuação em dB/cm ou dB/m
A/D	Analógico-digital
BUA	<i>Broadband Ultrasonic Attenuation</i>
C	Linguagem de programação
$c$	Velocidade da luz
C1	Chave 1
C2	Chave 2
CH1	Canal 1
CH2	Canal 2
CLR	<i>Clear</i>
CPLD	<i>Complex Programmable Logic Device</i>
d	Distância
$d$	Espessura
D/A	Digital-analógico
DARAM	RAM de acesso duplo de dado ou programa
dB	Decibel
DMA	<i>Direct access memory</i>
DSK	<i>DSP Starter Kit</i>
DSP	<i>Digital Signal Processor</i>
E/S	Entrada/saída
EF/OR	<i>Empty Flag/Output Ready</i>
$f$	Frequência de oscilação
FF/IR	<i>Full Flag/Input Ready</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transformation</i>
FIFO	<i>First-In-First-Out</i>
FWFT	<i>First-Word Fall-Through</i>
GND	Sinal terra (referência)

HF	<i>Half-Full</i>
HPI	<i>Host-Port-Interface</i>
Hz	<i>Hertz</i>
$I$	Intensidade acústica transmitida
$i$	Incidente
$I_0$	Intensidade acústica incidente
$k$	Número de onda
$K$	Constante de compressibilidade
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i>
LD	<i>Load</i>
LED	<i>Ligh Emitting Diode</i>
MCBSP	<i>Multichannel Buffered Serial Port</i>
MP/MC	<i>Microprocessor/Microcontroller Mode</i>
OE	<i>Output Enable</i>
$p$	Pressão
PAE	<i>Almost-Empty</i>
PAF	<i>Almost-Full</i>
PAGEN	Registro de geração de endereçamento de programa
PLL	<i>Phase-Locked-Loop</i>
R	Coeficiente de reflexão
$r$	Refletido
RAM	<i>Random Access Memory</i>
ROM	<i>Read Only Memory</i>
RS232	Interfase serial
SARAM	RAM de acesso único para programa
SMD	<i>Surface Mounted Device</i>
SRAM	<i>Static RAM</i>
$t$	Tempo
T	Coeficiente de transmissão
T1	Transdutor 1
T2	Transdutor 2
$t_M$	Tempo de propagação do som com o objeto
$t_m$	Tempo de propagação apenas no objeto

$t_r$	Tempo de propagação do som de referência
TTL	<i>Transistor-Transistor-Logic</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
$v$	Velocidade de propagação das partículas
$V_m(f)$	Valor absoluto do espectro de frequência do sinal que se propagou no material
$V_{sm}$	Velocidade de propagação do som no material analisado
$V_r(f)$	Valor absoluto do espectro de frequência do sinal de referência
$v_r$	Velocidade de propagação do som no meio de referência
$z$	Profundidade
$Z$	Impedância acústica característica
$\theta$	Ângulo
$\lambda$	Comprimento de onda
$\mu$	Coefficiente de atenuação
$\rho$	Densidade



## RESUMO

A utilização do ultra-som como alternativa às técnicas que utilizam radiação por raio-X, além de apresentar características não invasivas e não ionizantes, demanda baixo custo e possibilita a obtenção de informações das propriedades elásticas dos materiais. O presente trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema de aquisição e processamento de sinais por ultra-som para caracterização de meios biológicos e não biológicos. O sistema pode ser utilizado para realizar medidas da velocidade de propagação do som e atenuação da amplitude das ondas ultra-sônicas, além do processamento matemático da curva de atenuação em função da frequência para o cálculo da atenuação em banda larga (BUA). O *hardware* do sistema desenvolvido é composto por uma placa de controle e gerenciamento com o DSP TMS320VC5416 da Texas Instruments e uma placa com os circuitos lógicos, circuitos de transmissão e circuitos de recepção. Além disto, foram desenvolvidas *drivers* de potência para acionamento de motores de passo, utilizados para posicionamento dos transdutores de ultra-som nos testes de varredura de regiões de interesse. Os dados adquiridos pela unidade de recepção do sistema são enviados para um microcomputador via interface USB, onde são processados e arquivados. Os testes para avaliação do desempenho do sistema foram realizados no Laboratório de Engenharia Biomédica da UTFPR, com a geração de ondas ultra-sônicas nos métodos de transmissão-recepção e pulso-eco, utilizando-se dois transdutores de ultra-som com frequência central de 500 kHz, imersos em um pequeno tanque com água, para caracterizar diferentes meios de propagação (leite, acrílico, alumínio e pedra pome). Os resultados demonstraram que o sistema é adequado para fins de pesquisa, possibilitando novas aplicações, como no auxílio ao diagnóstico da osteoporose.

## ABSTRACT

The use of ultrasound as alternative to the techniques based on X-ray radiation, besides presenting non-invasive and non-ionizing characteristics, demand low cost and makes it possible to acquire information of the elastic properties of the materials. In this work it was developed an ultrasound acquisition and signals processing system to be used in the characterization of biological and non-biological media. The system may be used to measure the sound propagation speed, the attenuation of ultrasonic waves and also the mathematical processing of the attenuation as function of the frequency to calculate the broadband ultrasound attenuation (BUA). A control and management board with a DSP TMS320VC5416 of the Texas Instruments and a board with logical circuits, transmission circuits and reception circuits compose the hardware of the developed system. It was also developed power drivers for the step motors, used to position the ultrasound transducers during test of screening regions of interest. The data acquired by the system unit of reception are sent to a microcomputer by USB interface, where they are processed and recorded. The tests to evaluate the performance of the system had been carried out in the Biomedical Engineering Laboratory of the UTFPR, with the generation of ultrasonic waves in the transmission-reception and pulse-echo methods, using two ultrasound transducers with 500 kHz central frequency, submerged in a small water tank to characterize different media of propagation (milk, acrylic, aluminum and pome stone). These tests had demonstrated that the system may be useful for research purpose, making possible new applications, as the use of ultrasound to help in the osteoporosis diagnosis.

## CAPÍTULO 1

### 1 INTRODUÇÃO

#### 1.1 MOTIVAÇÕES

Atualmente várias técnicas baseadas em radiação têm sido utilizadas para auxílio no diagnóstico médico, tais como a tomografia por raio-X, tomografia axial computadorizada (TAC), tomografia por emissão de pósitron (TEP), ressonância nuclear magnética (RNM), tomografia ultra-sônica computadorizada (TUC), entre outras (WEBB, 1988). Entretanto, na busca contínua por tecnologias mais seguras e simples para aplicação na medicina, o ultra-som vem apresentando um papel cada vez mais importante, sendo atualmente a segunda técnica de formação de imagens mais utilizada clinicamente, preterida apenas pelo raio-X convencional (SHUNG, 1996).

Desde a década de 50, as técnicas de ultra-som vêm sendo aplicadas, com sucesso, em diversas áreas para testes e exames de várias estruturas. Dentre as aplicações principais do ultra-som, pode-se relacionar: medições de distâncias, espessuras, áreas e volumes, verificação de descontinuidade e rugosidade (corrosão) de materiais, determinação de falhas na geometria de um objeto, testes não destrutivos em materiais como polímeros e madeiras, e verificações na forma de estruturas submersas. Pode-se citar como áreas que utilizam o ultra-som em suas pesquisas, a medicina, a oceanografia, a metalurgia, a mecânica e a química, entre outras (DUARTE, MACHADO e PEREIRA, 1999; GRIMM e WILLIAMS, 1993).

Após a padronização do ultra-som *in vivo* por LANGTON, PALMER e PORTER (1984), diversas pesquisas, baseadas na reflexão das ondas, mostraram que o mesmo apresenta características que tornam seu emprego em procedimentos médicos vantajoso, tais como baixo custo, portabilidade, facilidade de manuseio, possibilidade de se conseguir gerar imagens em tempo real e prover informações das propriedades elásticas dos tecidos (algumas imperceptíveis através do raio-X), ser um método não invasivo e principalmente a sua característica de radiação não ionizante, o que permite a repetição dos testes com segurança (NICHOLSON *et al.*, 1997; NJEH *et al.*, 2001). Todos estes itens tornam o ultra-som ideal para auxílio no diagnóstico médico dentro da oftalmologia, neurologia, cardiologia, ginecologia, obstetrícia (AL-KARMI *et al.*, 1994), sendo as duas últimas especialidades as maiores beneficiadas com as características apresentadas, pois a radiação ultra-sônica, dentro

dos níveis de intensidades corretos, não apresenta risco para as células em fase de divisão (CHRISTENSEN, 1988).

A compreensão dos princípios básicos da geração de ondas ultra-sônicas, assim como de sua interação e propagação em diferentes meios é de grande importância para uma maior confiabilidade no processamento das informações obtidas por este tipo de radiação. A exatidão com que se procura quantificar estas informações depende do entendimento dos processos físicos da propagação e espalhamento das ondas ultra-sônicas nos diferentes meios, bem como dos métodos e da instrumentação utilizados para realizar estas medidas, como por exemplo: transdutores, capacidade dos equipamentos em fornecer as informações desejadas, o tipo de campo ultra-sônico, etc. (HULL *et al.*, 1996; NICHOLSON *et al.*, 1996; GREENLEAF, CHANDRASEKARAN e McCCANN, 1987).

Quanto maior o conhecimento sobre esses processos, melhor é a criação e emprego dos modelos físicos para análise dos campos ultra-sônicos transmitidos, refletidos e espalhados nos diversos meios. Além disso, o desenvolvimento de transdutores que produzam campos ultra-sônicos com características específicas a um determinado tipo de procedimento para obtenção da informação desejada, bem como de métodos que evitem os efeitos difrativos destes campos quando da medição de características ultra-sônicas, contribuirá significativamente para a melhoria da qualidade da informação clínica obtida (MAIA, 1995; LAUGIER, FOURNIER e BERGER, 1995; CHEN, TZENG e LIN, 1997; ALVES *et al.*, 1996).

A utilização do ultra-som como método para diagnóstico da osteoporose tem gerado grande interesse devido ao baixo custo e por sua característica não ionizante. O método utiliza a velocidade de propagação do som e a atenuação BUA (*Broadband Ultrasonic Attenuation*) das ondas de pressão nos ossos de regiões periféricas (geralmente o calcâneo e a região distal do antebraço) para acessar informações sobre a estrutura óssea e com isto permitir a detecção da osteoporose e prevenção do risco de fratura óssea (GREENLEAF, CHANDRASEKARAN e McCCANN, 1987; GIESEY, STEMM e ROTH, 1990; LAUGIER, FOURNIER e BERGER, 1995; MAIA, 2001; WEAR e ARMSTRONG, 2000).

Já existem alguns equipamentos comerciais baseados em ultra-som, que estão sendo utilizados para auxiliar no diagnóstico de pacientes com osteoporose (Osteotechnology Instrument - Signet; Diagnostic Medical System – DMS; Lunar Achilles – Lunar Inc.). Alguns desses equipamentos são utilizados para fazer medidas na região do calcâneo ou antebraço distal e utilizam BUA e velocidade de propagação do som, ou uma combinação de ambas, com medições realizadas em apenas um ponto das regiões citadas. Apesar da disponibilidade

desses no mercado, existe muita controvérsia na literatura quanto à exatidão de suas medidas e capacidade em fornecer as informações que possam, realmente, auxiliar no diagnóstico da osteoporose. Isto se deve ao fato que a realização das medidas em apenas um ponto fica muito susceptível a erros de posicionamento do calcâneo ou antebraço em relação aos transdutores, dificultando a reprodução dos resultados e podendo levar a diferenças superiores a 50 % nos cálculos (DUBOIS *et al.*, 2001; FUNKE *et al.*, 1995; MASSIE *et al.*, 1993; RESCH *et al.*, 1990).

Tendo em vista os problemas relacionados à osteoporose, recentemente foram realizadas pesquisas para utilização do ultra-som como auxílio ao diagnóstico da osteoporose (MAIA, 2001; MAIA *et al.*, 2001; MAIA *et al.*, 2002). Foi desenvolvido um sistema para realizar medidas de atenuação em banda larga (BUA) e outros parâmetros de ondas ultra-sônicas em vários pontos na região do calcâneo, que permite montar uma imagem na região de interesse evitando, desta forma, os problemas relacionados ao posicionamento do pé do paciente em relação aos transdutores. Para avaliar a técnica, foram realizados testes em 206 voluntários atendidos pelo Ambulatório de Reumatologia/Osteoporose do Hospital de Clínicas (HC/UNICAMP). Os resultados obtidos na pesquisa foram comparados com os exames de densitometria realizados no equipamento tipo DEXA do Serviço de Medicina Nuclear do HC e apresentaram correlação significativa ( $r = 0,75$ ;  $P < 0,0001$  na região do calcâneo), mostrando que a técnica pode ser utilizada como auxílio ao diagnóstico da osteoporose.

O sistema desenvolvido na pesquisa citada é de grande porte, o que dificultou a realização de testes em um número maior de pacientes e em outras unidades de saúde. Neste trabalho propõe-se o desenvolvimento do *hardware* e *software* de um sistema portátil para realizar medidas de parâmetros de ondas ultra-sônicas em diferentes meios, que possa futuramente ser utilizado para realizar testes em pacientes, de forma a obter informações que possam ser correlacionadas à massa óssea e auxiliem no diagnóstico da osteoporose, dando continuidade à pesquisa.

## 1.2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho de pesquisa foi a concepção e o desenvolvimento de um sistema de aquisição e processamento de sinais de ultra-som, para equipar o Laboratório de Engenharia Biomédica da UTFPR com instrumentação eletrônica adequada para o estudo dos

parâmetros ultra-sônicos, como velocidade de propagação acústica e atenuação das ondas ultra-sônicas em diferentes materiais. Além disso, realizar a análise do desempenho do sistema de ultra-som com transdutores de 500 kHz posicionados em distâncias diferentes e com taxa de amostragem configurável entre 5 e 80 MHz, para as técnicas de transmissão-recepção e pulso-eco, assim como a avaliação de sua possível utilização como auxílio ao diagnóstico médico da osteoporose por ultra-som.

### 1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está organizada em cinco capítulos. No capítulo 2, faz-se uma revisão da literatura sobre os princípios físicos das ondas sonoras e ultra-sônicas, relacionando os principais parâmetros de medida e as técnicas utilizadas para caracterização de meios biológicos por ultra-som. O capítulo 3 descreve em detalhes o *hardware* e *firmware* do sistema de aquisição, e as rotinas de *software* utilizadas para processamento dos resultados. No capítulo 4 são relatados os resultados obtidos e o capítulo 5 apresenta a discussão dos resultados, as conclusões do trabalho e as propostas de trabalhos futuros.

## CAPÍTULO 2

### 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentados os aspectos relacionados às características das ondas e descritos os principais conceitos sobre a teoria do ultra-som que será aplicada para análise dos dados obtidos. Esses conceitos são de fundamental importância para uma melhor compreensão do princípio de funcionamento e das características do sistema de ultra-som desenvolvido.

#### 2.1 A EQUAÇÃO GERAL DAS ONDAS E SOLUÇÕES

As ondas sonoras e ultra-sônicas consistem em um distúrbio mecânico de um meio (gás, líquido ou sólido) que se propaga de molécula a molécula a uma determinada velocidade, causando variação na densidade ou pressão do meio ao seu redor. O número de oscilações das moléculas por unidade de tempo é a frequência do som no meio, mensurada em *Hertz* (1 ciclo por segundo = 1 Hz). Para frequências acima de 20 kHz o som é inaudível aos ouvidos humanos e as ondas mecânicas são conhecidas como ultra-som (FISH, 1990; TER HAAR, 1978).

Quanto à relação entre a direção da perturbação e propagação, existem basicamente dois tipos de movimento da onda: transversal ou de cisalhamento e longitudinal ou compressional, representados na Tabela 1. Nas ondas transversais o distúrbio é perpendicular à direção de propagação da onda. Como exemplo de ondas transversais pode-se citar aquelas que se propagam na superfície da água. Nas ondas longitudinais a vibração das partículas está na mesma direção de propagação da onda. Como exemplos das ondas longitudinais existem as ondas sonoras e ultra-sônicas, frequentemente chamadas de ondas de compressão (OKUNO, CALDAS e CHOW, 1982).

Tabela 1 – Representação da velocidade das partículas e direção de propagação das ondas.

Parâmetro	Ondas transversais ou de cisalhamento	Ondas longitudinais ou compressionais
Velocidade das partículas		
Direção de propagação das ondas		

As ondas ultra-sônicas podem ser representadas através da equação unidimensional da onda para a variável pressão  $p$ , apresentada pela Equação 1 (CHRISTENSEN, 1988):

$$\frac{\partial^2 p}{\partial z^2} - \rho K \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

Onde:

- $z$  representa o eixo longitudinal de propagação do distúrbio mecânico;
- $p$  é a pressão ao longo do eixo  $z$ ;
- $\rho$  é a densidade média do material sem perturbação (uma constante);
- $K$  é a constante de compressibilidade adiabática do material;
- $t$  representa a unidade de tempo.

CHRISTENSEN (1988) descreveu de forma simplificada algumas das possíveis soluções da equação da onda unidimensional para a variável pressão  $p$ , mostradas de forma resumida na Tabela 2 e utilizadas para a apresentação dos principais conceitos das ondas sonoras e ultra-sônicas.

A solução completa para a equação das ondas pode ser encontrada no trabalho apresentado por ARNOLD (1990), que se baseou nos trabalhos de MORSE e FESHBACH (1953) e TUPHOLME (1969). Nestes trabalhos, os autores utilizaram as funções matemáticas de Green para resolver a equação geral de ondas.

Tabela 2 – Soluções da equação unidimensional da onda para variável pressão.

Soluções	Comentários
$p = p_+ \cos(\omega t - kz)$	Onda viajando na direção $+z$
$p = p_- \cos(\omega t + kz)$	Onda viajando na direção $-z$
$p = p_+ \text{sen}(\omega t - kz)$	Onda deslocada $\pi/2$ radianos
$p = p_+ \cos(\omega t - kz + \phi)$	Onda com fase arbitrária
$p = p_{\mp} f(\omega t \pm kz)$	Qualquer função ( $f$ ) de $\omega t \pm kz$

Onde:

- $p_+$  e  $p_-$  são as amplitudes de pressão (constantes);
- $\omega$  é a frequência angular da onda em radianos por segundo (rad/s);
- $k$  é a constante de propagação que representa o número de onda.

As características de tempo e espaço da onda podem ser representadas através da Equação 2, que representa a magnitude da pressão em função da distancia longitudinal  $z$ , no instante de tempo  $t = 0$ . A Figura 1(a) mostra o formato da onda de pressão representada pela Equação 2.

$$p = p_+ \cos(\omega t - kz) \quad (2)$$

Considerando que a fase é  $\omega t - kz$ , e  $t$  é fixo nesta análise, uma mudança de  $2\pi$  na fase é alcançada quando  $kz$  aumenta  $2\pi$  radianos. Para isto, é necessária uma mudança de  $2\pi/k$  na distância  $z$ , e este espaço de repetição é conhecido como comprimento de onda  $\lambda$  da onda e representado pela Equação 3:

$$\lambda = \frac{2\pi}{k} \quad (3)$$

Agora considerando a Figura 1(b) na qual o tempo é avançado por  $\Delta t$ , as posições dos picos da onda (iguais ou múltiplos de  $2\pi$ ), representadas pelas linhas tracejadas, foram avançados de  $\Delta z$ .

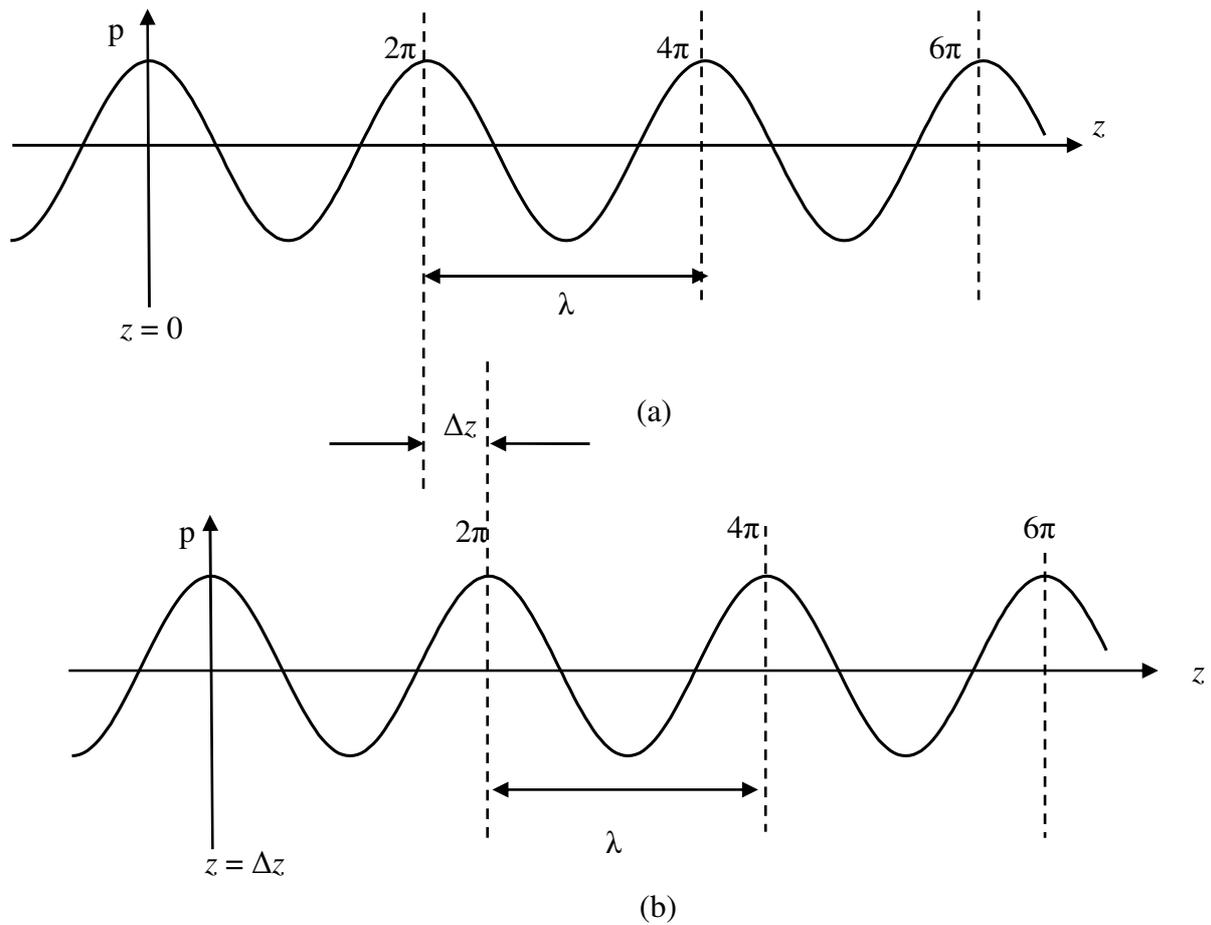


Figura 1 - Ondas de pressão em função da distância  $z$ ; (a) em  $t = 0$ ; (b) em  $t = \Delta t$ .

Através da Figura 1(a e b) é possível calcular a velocidade da onda, considerando o termo  $(\omega t - kz)$  sempre igual a zero. Quando  $t = 0$ , a posição inicial da onda é em  $z = 0$ . Quando  $t = \Delta t$ , a posição inicial da onda é em  $z = \Delta z$ , de tal maneira:

$$\omega \Delta t - k \Delta z = 0$$

ou na forma da Equação 4,

$$\frac{\Delta z}{\Delta t} = \frac{\omega}{k} \quad (4)$$

que resulta na velocidade da onda conhecida como velocidade de fase longitudinal  $c$  da onda (Equação 5):

$$c = \frac{\omega}{k} \quad (5)$$

A Figura 1 não apresenta somente a solução da onda com comportamento senoidal como uma função da distância  $z$ , mas também com uma função do tempo  $t$ . Com isso, a frequência temporal da oscilação senoidal é apresentada na Equação 6,

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (6)$$

e combinando as Equações 3, 5 e 6, a Equação 7, que representa a comprimento de onda  $\lambda$  relacionando velocidade e frequência, é obtida (KINSLER e FREY, 1950):

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (7)$$

## 2.2 IMPEDÂNCIA ACÚSTICA E INTENSIDADE DA ONDA

A impedância acústica  $Z$  é a propriedade de um meio se opor à vibração de suas partículas, frente à passagem de ondas ultra-sônicas. Indica a propriedade que as ondas têm de se deslocarem mais facilmente em alguns meios que em outros. Existem diferentes formas de expressar a impedância acústica (FREDERICK, 1965), no entanto, usa-se comumente a impedância acústica característica do meio ou resistência acústica, que é obtida pela Equação 8 (WEBSTER, 1998; ERIKSON e FRY, 1974):

$$Z = \rho c \quad (8)$$

sendo  $\rho$  a densidade do meio e  $c$  a velocidade de propagação da onda no meio.

Considerando a Equação 9 e isolando a densidade do meio  $\rho$ , a equação da impedância acústica característica pode ser reescrita na forma da Equação 10, mostrando a relação entre a pressão aplicada  $p$  e a velocidade da partícula  $v$  (CHRISTENSEN, 1988):

$$p = \rho c v \quad (9)$$

$$Z = \frac{p}{v} \quad (10)$$

A Tabela 3 mostra a impedância característica de diversos meios, assim como suas densidades, velocidades e outros parâmetros da onda ultra-sônica nesses meios.

Tabela 3 – Propriedades acústicas típicas de vários meios (Adaptado de BRONZINO (1986) e YOUNG, (1990)).

Material	Velocidade c (m/s)	Densidade $\rho$ (g/ml)	Impedância $Z = \rho c$ ( $10^6$ kg/m <sup>2</sup> s)	Atenuação $\alpha$ 1 MHz (dB/cm)	Dependência de $\alpha$ com a frequência $f$
Ar	330	0,0012	0,0004	1,2	$f^2$
Alumínio	6300	2,70	17	0,018	$f$
Sangue	1530	1,06	1,6	0,1	$f^{1,3}$
Osso Compacto	2700 - 4100	1,38 - 1,81	3,7 - 7,4	10	$f^{1,5}$
Gordura	1460 - 1470	0,92	1,4	0,6	$f$
Pulmão	650	0,40	0,26	40	$f^{0,6}$
Músculos	1540 - 1630	1,07	1,7	1,5 - 2,5	$f$
Água	1520	1,00	1,5	0,002	$f^2$
PVC	2400	1,05	2,5	0,35	$f^2$

Quando uma onda atravessa um meio, as partículas do meio começam a vibrar e adquirir energia cinética. A energia fornecida pelas ondas ultra-sônicas ao atravessar o meio é medida pela intensidade acústica da onda (OKUNO, CALDAS e CHOW, 1982). A intensidade  $I$  é expressa em W/cm<sup>2</sup> ou W/m<sup>2</sup> e representada através das seguintes relações que resultam na Equação 11:

$$I = \frac{\text{potência}}{\text{área}} = \frac{\text{trabalho}}{\text{área} * \text{tempo}} = \frac{\text{força} * \text{distância}}{\text{área} * \text{tempo}} = \text{pressão} * \text{velocidade}$$

ou

$$I = pv \quad (11)$$

Substituindo a Equação 10 na 11, são obtidas as Equações 12 e 13, que relacionam intensidade acústica com impedância do meio (CHRISTENSEN, 1988):

$$I = \frac{p^2}{Z} \quad (12)$$

$$I = Zv^2 \quad (13)$$

### 2.3 REFLEXÃO E REFRAÇÃO DE ONDAS EM SUFERCÍCIAS PLANAS

Quando uma onda encontra uma interface entre dois meios diferentes, parte da onda é refletida e outra é refratada. A onda refletida retorna em direção oposta e com velocidade igual à da onda incidente. A onda transmitida, ou refratada, continua no mesmo sentido da onda incidente, mas com velocidade correspondente à velocidade de propagação do som no meio (CHRISTENSEN, 1988). Considerando que os sufixos  $i$ ,  $r$  e  $t$  referem-se respectivamente às ondas incidentes, refletidas e transmitidas, a Figura 2 apresenta o comportamento das ondas sonoras e ultra-sônicas.

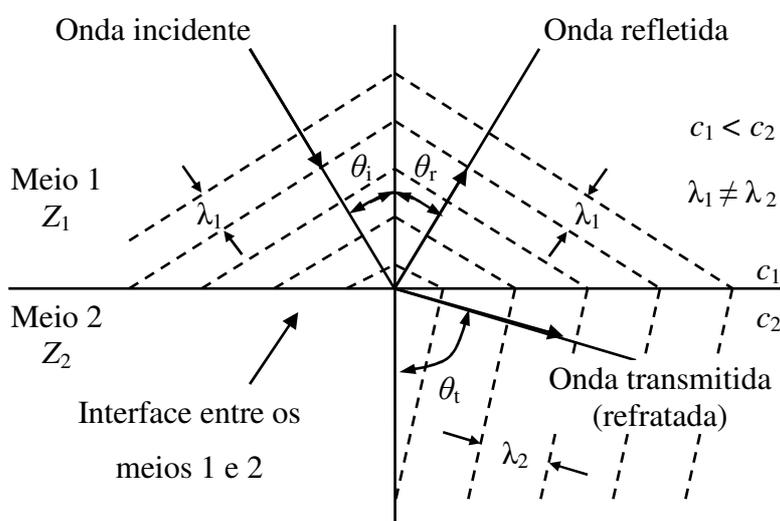


Figura 2 – Comportamento da onda que incide na interface entre os meios 1 e 2, considerando  $c_1 < c_2$  e, portanto  $\theta_i < \theta_t$ .

Da mesma forma que na ótica, as leis geométricas da reflexão se aplicam. Os ângulos de incidência e de reflexão são iguais no mesmo plano para ondas longitudinais desde que o comprimento de onda da onda ultra-sônica não seja comparável ou maior que as dimensões do objeto refletor (WELLS, 1977). Assumindo que o comprimento de onda seja pequeno quando comparado às dimensões da interface, são obtidas as Equações 14 e 15, sendo a última conhecida como Lei de Snell (McDICKEN, 1981):

$$\theta_i = \theta_r \quad (14)$$

$$\frac{(\text{sen } \theta_i)}{(\text{sen } \theta_t)} = \frac{c_1}{c_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \quad (15)$$

Onde:

- $\theta_i$  e  $\theta_r$  são os ângulos de incidência e de reflexão da onda;
- $c_1$  e  $c_2$  são as velocidades de propagação do som nos meios 1 e 2, respectivamente;
- $\lambda_1$  e  $\lambda_2$  são os comprimentos de onda das ondas que se propagam nos meios 1 e 2, respectivamente.

Para qualquer valor particular de  $c_1/c_2$ ,  $\theta_t$  aumenta à medida que  $\theta_i$  aumenta. Com  $c_1 < c_2$ ,  $\theta_t$  atinge  $\pi/2$  radianos antes que  $\theta_i$  seja igual a  $\pi/2$ , e neste caso resultando na reflexão total. Quando  $\theta_t = \pi/2$ ,  $\sin \theta_t = 1$ , de tal forma que o ângulo crítico para ocorrer reflexão total é dado pela Equação 16:

$$\theta_i = \text{sen}^{-1}\left(\frac{c_1}{c_2}\right) \quad (16)$$

Quando uma onda se propaga através de um meio homogêneo onde não haja descontinuidade na pressão ou velocidade das partículas e esta atinge a interface entre os dois meios, tanto a componente normal da velocidade quanto a pressão são contínuas através da interface. Em termos físicos, isto assegura que os dois meios permanecem em contato um com o outro. Estas condições são satisfeitas através das Equações 17 e 18:

$$p_t = p_i + p_r \quad (17)$$

e

$$v_t \cos \theta_t = v_i \cos \theta_i - v_r \cos \theta_r \quad (18)$$

A porcentagem de energia refletida ( $R = I_r / I_i$ ) e transmitida ou refratada ( $T = I_t / I_i$ ) é obtida através das Equações 19 e 20, sendo  $I_i$ ,  $I_r$  e  $I_t$  as intensidades incidente, refletida e transmitida, respectivamente (ERIKSON e FRY, 1974):

$$R = \frac{I_r}{I_i} = \left( \frac{Z_2 \cos \theta_i - Z_1 \cos \theta_t}{Z_2 \cos \theta_i + Z_1 \cos \theta_t} \right)^2 \quad (19)$$

e

$$T = \frac{I_t}{I_i} = \frac{4Z_2 Z_1 \cos \theta_i \cos \theta_t}{(Z_2 \cos \theta_i + Z_1 \cos \theta_t)^2} \quad (20)$$

onde  $Z_1$  e  $Z_2$  são as impedâncias características dos meios 1 e 2, respectivamente.

Quando ocorre incidência normal,  $\theta_i = \theta_t = 0$ , as Equações 19 e 20 são simplificadas obtendo as Equações 21 e 22 (ERIKSON e FRY, 1974; OKUNO, CALDAS e CHOW, 1982):

$$R = \left( \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2 \quad (21)$$

e

$$T = \frac{4Z_2Z_1}{(Z_2 + Z_1)^2} \quad (22)$$

## 2.4 TRANSDUTOR

Os transdutores são dispositivos constituídos por lâminas de cristal que possuem a capacidade de responder a uma tensão elétrica, gerando deformações físicas no cristal. Este fenômeno, denominado piezoeletricidade, foi descoberto pelos irmãos Pierre e Jacques Curie em 1880. Hoje se sabe que a piezoeletricidade é uma propriedade natural de certos cristais e substâncias cristalizadas que apresentam anisotropia, ou seja, a capacidade de reagir diferentemente de acordo com a direção de propagação de um fenômeno físico sobre si, como luz, o calor, etc. (TER HAAR, 1999).

Para a geração das ondas ultra-sônicas são aplicados sinais elétricos de alta amplitude nos transdutores piezoelétricos fazendo com que o cristal momentaneamente mude de tamanho, devido ao realinhamento das moléculas polarizadas, aumentando ou diminuindo a pressão na parede frontal do transdutor, produzindo as ondas de ultra-som. Na recepção o processo inversor ocorre, sendo que o transdutor receptor converte o sinal ultra-sônico que se propagou no meio em sinal elétrico.

Alguns cristais naturais como o quartzo e a turmalina são piezoelétricos podendo ser usados como transdutores. No entanto, os transdutores podem ser produzidos com cerâmicas piezoelétricas artificiais, como por exemplo, o titanato de bário (BaTiO<sub>3</sub>) e o titanato-zirconato de chumbo (PZT) (YOUNG, 1990).

Atualmente a faixa de frequência dos transdutores comerciais utilizados para diagnóstico médico está entre 5 MHz a 30 MHz, sendo os principais fabricantes as empresas Siemens, General Eletric (GE), Toshiba, Agilent (HP), Dasonics e Medison.

## 2.5 MÉTODOS PARA CARACTERIZAÇÃO DE MEIOS BIOLÓGICOS ATRAVÉS DA TÉCNICA DE ULTRA-SOM

As ondas ultra-sônicas podem sofrer reflexão, refração ou difração quando o feixe encontra uma interface entre meios com características acústicas diferentes. Baseados nesse

comportamento dois métodos experimentais são geralmente utilizados para caracterização de meios biológicos e não biológicos por ultra-som: o método pulso-eco (reflexão) e o método transmissão-recepção. A combinação desses dois métodos permite obter informações sobre distância entre objetos, velocidade de propagação e atenuação de ondas ultra-sônicas nos meios (MAIA, 2001).

### 2.5.1 Método pulso-eco

No método pulso-eco, apresentado no esquema da Figura 3, o mesmo transdutor atua como transmissor e como receptor de ondas ultra-sônicas. Neste caso, um pulso elétrico é aplicado ao transdutor e este gera uma onda ultra-sônica (sinal  $A$  na Figura 3). A onda ultra-sônica propaga-se através do meio 1 e, assim que encontra a interface entre os meios 1 e 2, parte da onda é refletida (sinal  $A_{r1}$  da Figura 3) e outra propaga-se através do meio 2 (sinal  $A_t$  Figura 3). Da mesma forma, a onda que se propaga através do meio 2, ao encontrar uma outra interface, terá parte refletida e parte transmitida. As ondas refletidas que são captadas pelo transdutor ( $A_{r1}$  e  $A_{r2}$ ), trazem informações sobre a distância ou a velocidade de propagação através da Equação 23:

$$c = \frac{z}{t} \quad (23)$$

Onde:

- $c$  é a velocidade de propagação da onda ultra-sônica;
- $z$  é o espaço percorrido (no método pulso-eco equivalente a duas vezes a distância entre o transdutor e o objeto alvo);
- $t$  é o tempo decorrido entre a aplicação do pulso e a recepção do eco.

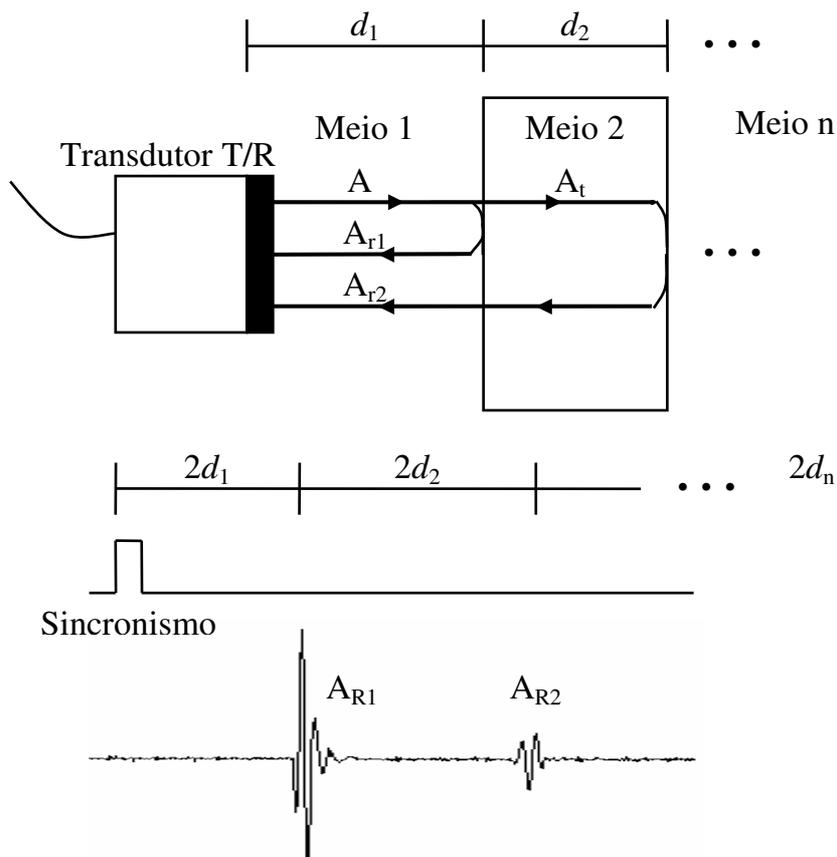


Figura 3 – Representação da geração de ondas ultra-sônicas pelo método pulso-eco para determinação de parâmetros e caracterização de diferentes meios.

Também é possível obter informações sobre atenuação processando-se os ecos recebidos. Conhecendo-se a velocidade de propagação nos meios, pode-se determinar a distância percorrida pelas ondas ( $d_1$ ,  $d_2$ , etc.) utilizando o tempo decorrido entre a excitação do transdutor (a partir do sinal de sincronismo) e o instante em que as ondas refletidas ( $A_{r1}$ ,  $A_{r2}$ , etc.) foram captadas.

### 2.5.2 Método transmissão-recepção

No método transmissão-recepção, apresentado no esquema da Figura 4, são utilizados dois transdutores independentes para transmitir e receber as ondas ultra-sônicas. Neste caso, um pulso elétrico é aplicado ao transmissor (T), gerando uma onda ultra-sônica que se propaga através do meio e será captada no transdutor receptor (R).

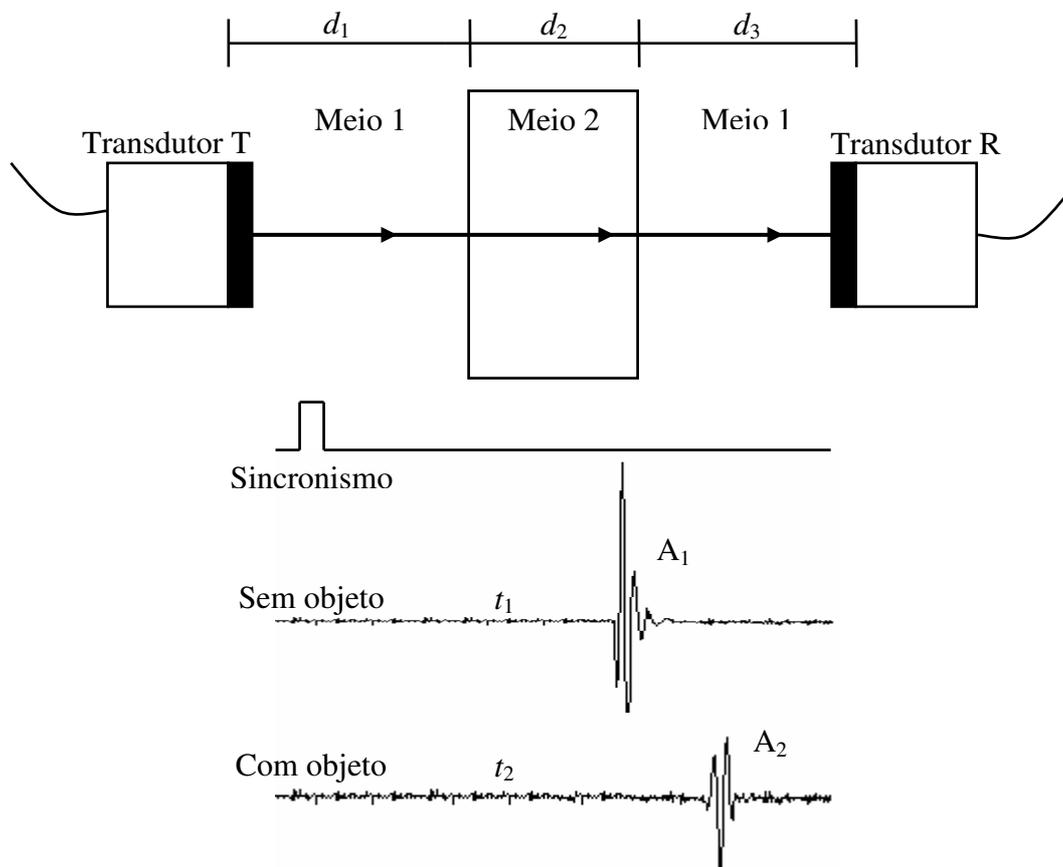


Figura 4 – Representação da geração de ondas ultra-sônicas pelo método transmissão-recepção para determinação de parâmetros e caracterização de diferentes meios.

Este método pode fornecer informações sobre o tempo de propagação e atenuação das ondas ultra-sônicas em função da presença ou não de objetos (meios com características acústicas diferentes) na trajetória de propagação da onda.

## 2.6 ATENUAÇÃO

A atenuação corresponde ao decréscimo da intensidade em função da distância da fonte sonora, e ocorre devido a fatores geométricos (dimensões da fonte sonora, comprimento da onda, presença de superfícies refletoras, etc.) e por mecanismos de absorção (viscosidade, tempo de relaxação, etc.) Estes mecanismos possuem características diferentes de acordo com o meio. Nos tecidos biológicos a atenuação deve-se principalmente aos mecanismos de absorção, isto é, mecanismos através dos quais a energia mecânica das ondas ultra-sônicas é convertida em calor (TER HAAR, 1999).

Segundo GEDDES e BAKER (1989) e WELLS (1977), quando uma onda se propaga num meio real, sua intensidade decai com a distância percorrida em função dos seguintes fatores:

- Absorção pelo meio, onde parte da energia é convertida em calor, principalmente devido às forças de atrito que agem em oposição ao movimento das partículas. Esta propriedade é usada na fisioterapia, sendo a principal causa da atenuação do ultra-som (OKUNO, CALDAS e CHOW, 1982);
- Divergência do feixe em relação ao eixo central (o que provoca uma diminuição da energia por unidade de área);
- Espalhamento devido à não homogeneidade do meio (uma parcela da energia se desvia da direção inicial);
- Conversão em outros modos de vibração resultando no compartilhamento da energia com duas ou mais ondas propagando-se com velocidades e sentidos diferentes (FISH, 1990).

A atenuação da onda ultra-sônica obedece a lei exponencial mostrada na Equação 24 (OKUNO, CALDAS e CHOW, 1982; ERIKSON e FRY, 1974; TER HAAR, 1999):

$$I = I_0 e^{-\mu z} \quad (24)$$

Onde:

- $I$  é a amplitude da intensidade transmitida do ultra-som após ultrapassar uma distância  $z$ ;
- $I_0$  é a amplitude da intensidade incidente inicial em  $z=0$ ;
- $\mu$  é o coeficiente de atenuação com unidade em  $m^{-1}$  ou  $cm^{-1}$  e definido pela Equação 25, (LAUGIER, FOURNIER e BERGER, 1995):

$$\mu = -\frac{1}{z} \ln\left(\frac{I}{I_0}\right) = \frac{\ln(I_0) - \ln(I)}{z} \quad (25)$$

ou expresso em dB/m ou dB/cm através da Equação 26:

$$\alpha = \mu * 20 \log_{10} e = 8,686\mu \quad (26)$$

Apesar do coeficiente de atenuação variar praticamente com o quadrado da frequência no ar e líquidos, nos tecidos biológicos a atenuação apresenta dependência quase linear com a frequência, para a faixa de frequência entre 0,1 a 1 MHz (BALDEWECK *et al.*, 1993). A Tabela 3, apresentada anteriormente, mostra alguns valores típicos do coeficiente de atenuação  $\alpha$  em dB/cm, Equação 26, e sua dependência com a frequência.

Além deste mecanismo clássico de atenuação em fluídos, outros mecanismos podem contribuir para a atenuação, dependendo do meio de propagação e da frequência, entre eles:

- **Relaxação:** O processo de relaxação está relacionado com a energia interna da molécula, nas formas de energia cinética rotacional, translacional, etc. Desta forma, quando uma onda ultra-sônica passa através da molécula, ocorre um aumento de uma ou mais destas formas de energia. Durante o semi-ciclo de compressão da onda, ocorre o armazenamento de energia na molécula e durante o semi-ciclo de descompressão, se houver uma mudança da energia de um modo para outro, nem toda energia retornará ao modo de vibração principal, sendo que parte dela retornará fora de fase com relação à onda que se propaga, causando interferência destrutiva no semi-ciclo de descompressão e provocando atenuação.
- **Movimento relativo:** O movimento relativo produzido por um campo ultra-sônico entre elementos estruturados (como as células biológicas) e seus arredores resulta em absorção de energia. Em geral, o movimento relativo é devido à radiação de pressão agindo em uma interface onde há mudanças de impedância.
- **Bolhas de gás:** A presença de bolhas de gás no meio de propagação da onda pode exercer influências marcantes no material biológico e contribuir para a atenuação. Isto ocorre porque, como pode ser visto na Tabela 3, na interface líquido-ar há uma mudança brusca na impedância e, neste caso, a reflexão será praticamente total.

### 2.6.1 Atenuação em Banda Larga - BUA

Como descrito anteriormente, a atenuação é a razão das amplitudes do sinal inicial e do recebido em uma determinada frequência. No entanto, um dos parâmetros de propagação ultra-sônica mais utilizado é a expressão da taxa de atenuação em uma determinada faixa de frequências, também conhecida como BUA (STRELITZKI e EVANS, 1996; HULL *et al.*, 1996; LANGTON, PALMER e PORTER, 1984). Assim, é possível que materiais diferentes tenham valores similares de BUA, porém valores de atenuação em uma frequência específica significativamente diferentes (MAIA, 2001).

O BUA foi introduzido primeiramente por LANGTON, PALMER e PORTER (1984) e é determinado adequando-se os valores de atenuação dentro de uma faixa de frequência selecionada em uma linha reta. Esta aproximação da atenuação em função da frequência  $\alpha(f)$  é representada pela Equação 27, sendo  $A$  o coeficiente linear e  $B$  o valor BUA determinado através da taxa de inclinação (coeficiente angular) da reta de regressão linear, do gráfico gerado pela atenuação versus frequência (GRIMM e WILLIAMS, 1993).

$$\alpha(f) = A + B * f \quad (27)$$

Para determinar o BUA de um material, é necessário comparar o espectro de frequência do sinal ultra-sônico de um material de referência na faixa de frequências desejada, por exemplo, água degaseificada, com o espectro de frequência do sinal obtido após a propagação através do material (Figuras 5 e 6).

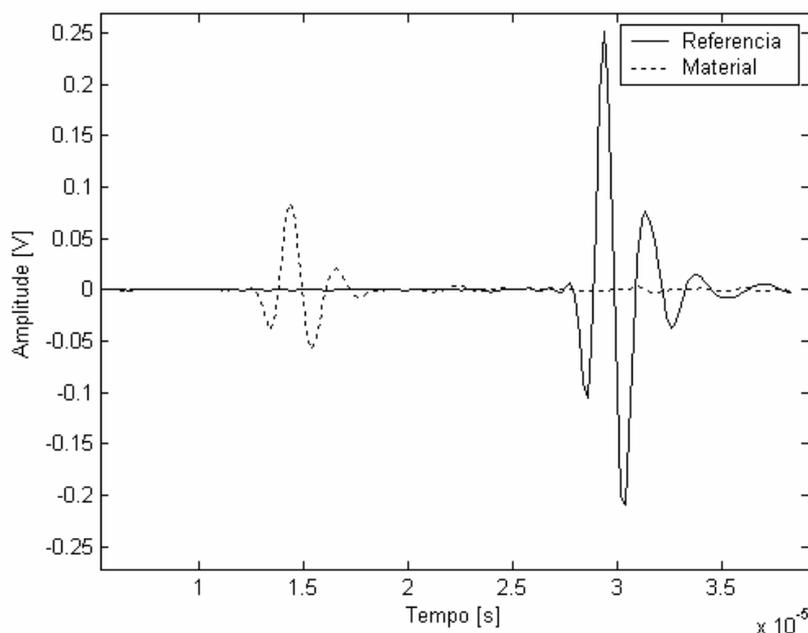


Figura 5 – Sinal de referência (contínuo) e sinal transmitido através do material (tracejado).

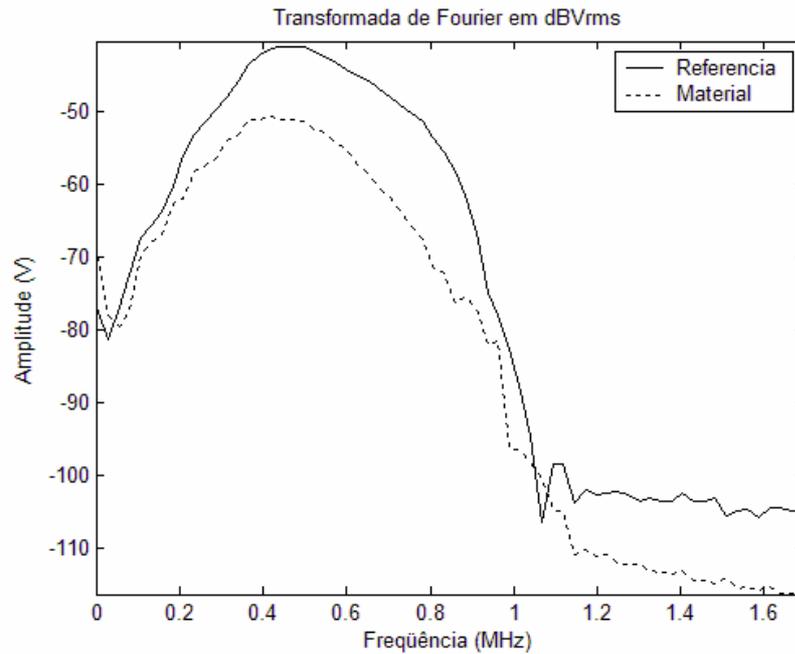


Figura 6 – Espectro de frequências do sinal de referência (contínuo) e do sinal que se propagou através do material (tracejado).

O resultado da comparação entre os espectros de frequência dos dois sinais, que é obtido através da Equação 28, resulta em uma região onde há uma relação aproximadamente linear (Figura 7), representada pela Equação 27, citada anteriormente, com unidade dB/MHz.

$$\alpha(f) = \left| 20 \log_{10} |V_r(f)| - 20 \log_{10} |V_m(f)| \right| \quad (28)$$

Onde:

- $V_r(f)$  é o valor absoluto do espectro de frequência do sinal de referência;
- $V_m(f)$  é o valor absoluto do espectro de frequência do sinal que se propagou no material.

Este é um parâmetro de densidade por área que define um valor de BUA para um volume conhecido de seção transversal (área da face do transdutor), mas com espessura desconhecida (HULL *et al.*, 1996). Ele vem sendo utilizado por vários autores como um parâmetro de quantificação de massa de diferentes materiais, entre eles o osso, para o qual é utilizado no diagnóstico da osteoporose (HULL *et al.*, 1996; XU e WEAR, 1993; DROIN, BERGER, LAUGIER, 1998).

Geralmente os dados são coletados utilizando-se o método transmissão-recepção e, esta forma, é possível compensar as variações da amplitude do sinal com a frequência para um determinado par de transdutores (MAIA, 2001; WELLS, 1993).

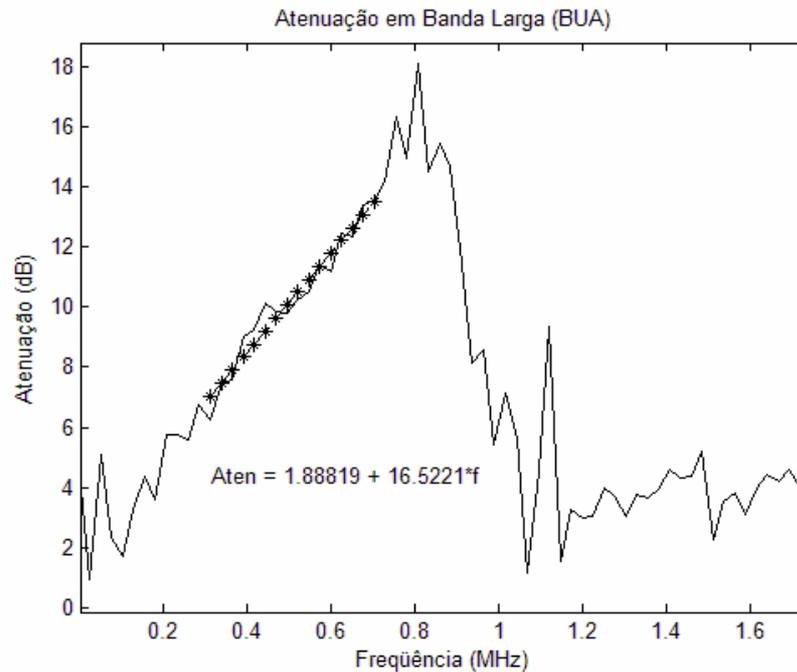


Figura 7 – Atenuação em função da frequência. O coeficiente angular da curva de regressão é a Atenuação em Banda Larga (BUA) em dB/MHz.

## 2.7 VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS ULTRA-SÔNICAS

Da mesma forma que a atenuação, a velocidade de propagação das ondas ultra-sônicas depende das propriedades do meio de propagação. Considerações sobre a física da propagação de ondas, geralmente, levam a velocidades distintas: (1) velocidade de fase, que é a velocidade de uma onda senoidal de frequência única; (2) velocidade de grupo que é a velocidade do centro de uma onda com várias componentes de frequência e (3) velocidade do sinal, que é a velocidade da frente de onda de um pulso ultra-sônico. Em meios não dispersivos como a água, as velocidades de fase e de grupo são iguais. Já em meios como o osso, onde ocorre muita dispersão, cada componente de frequência propaga-se em velocidade própria e, portanto, valores diferentes são obtidos dependendo do intervalo de frequências em que são calculadas (NICHOLSON *et al.*, 1996; LE, 1998; WEAR, 2000).

No modo transmissão-recepção, considerando-se a propagação de uma onda ultra-sônica no meio de referência (água) e depois a propagação através de um material de espessura conhecida ( $d$ ) e distância entre os transdutores ( $d_t$ ) é possível determinar a

velocidade de propagação das ondas ultra-sônicas no material utilizando-se as Equações 29, 30 e 31:

$$v_r = \frac{d_t}{t_r} \quad (29)$$

$$v_{sm} = \frac{d}{t_m} \quad (30)$$

$$v_r = \frac{d_t - d}{t_M - t_m} \quad (31)$$

Isolando-se  $d_t$  na Equação 29,  $t_m$  em 30 e substituindo em 31, chega-se à Equação 32:

$$v_{sm} = \frac{v_r * d}{d - v_r * (t_r - t_M)} \quad (32)$$

Onde:

- $v_{sm}$  é a velocidade de propagação do som no material analisado;
- $v_r$  é a velocidade de propagação do som no meio de referência (água);
- $d$  é a espessura do material a ser analisado;
- $t_r$  é o tempo de propagação do som de referência (sem o objeto);
- $t_M$  é o tempo de propagação do som com o objeto;
- $t_m$  é o tempo de propagação apenas no objeto.

Através da Equação 32 pode-se determinar a velocidade de propagação do som no material independentemente da distância entre os transdutores (transmissor e receptor) e também não é necessário saber o tempo de propagação total no material de referência e no objeto. Basta conhecer a diferença entre eles.

Algumas técnicas podem ser utilizadas para calcular o tempo de trânsito das ondas ultra-sônicas, entre elas:

- Ponto de chegada da onda: o tempo é medido para o primeiro ponto onde existe um desvio aparente do eixo horizontal (eixo do tempo). Problemas desta técnica são relacionados ao ruído geralmente presente nos sinais, o que dificulta a determinação exata do ponto de medição (NICHOLSON *et al.*, 1996);
- Nível: determina-se um nível de tensão para o qual será medido o instante de tempo. Geralmente utiliza-se o primeiro meio-ciclo da onda e a medida é feita a 10 % da amplitude do mesmo (NICHOLSON *et al.*, 1996);

- Cruzamento por zero: o instante de tempo é medido no ponto onde ocorre o primeiro ou outros cruzamentos por zero. Neste caso, a dependência da atenuação e da velocidade com a frequência (dispersão) pode alterar a forma do pulso ultra-sônico durante a propagação e, conseqüentemente, alterar os cruzamentos por zero e a estimativa da velocidade da onda ultra-sônica (WEAR, 2000);
- Correlação cruzada: envolve a comparação de um sinal de referência ou padrão com outro sinal para encontrar a coerência ou similaridade entre ambos. O ponto onde ocorre a maior similaridade entre os sinais é o de maior valor absoluto para a correlação. No caso da comparação entre o sinal de referência (água) e o que se propagou através do material, o valor da correlação representa a diferença entre os tempos em que houve maior similaridade entre eles, e este valor pode ser utilizado para determinar a velocidade de propagação do som no material através da Equação 32 (LE, 1998);
- Velocidade de fase: utiliza-se a análise espectral para determinar a fase dos sinais e a velocidade para cada frequência em uma faixa desejada (NICHOLSON *et al.*, 1996);
- Envelope: o envelope do sinal é determinado e é utilizado o ponto de máxima amplitude para calcular a velocidade. Este método é mais consistente que o cruzamento por zeros e mais tolerante a ruídos que a técnica do ponto de chegada da onda (LE, 1998).

LE (1998) comparou as técnicas para determinação da velocidade das ondas ultra-sônicas utilizando sinais simulados sem ruído (ideal) e com a presença de ruído (o mais próximo do caso real) e obteve erros de 3,2 % para o ponto de chegada da onda, 5,3 % para o primeiro cruzamento por zero, 6,7 % para a correlação cruzada e 2,6 % para o envelope.

### 2.7.1 Técnica para cálculo utilizando o envelope do sinal ultra-sônico

O envelope de um sinal pode ser determinado matematicamente utilizando-se a Transformada de Hilbert (LE, 1998; OPPENHEIN e SCHAFER, 1975).

Um sinal analítico  $\psi(t)$  é um sinal no domínio complexo formado por suas componentes real  $x_r(t)$  e imaginária ou quadratura  $x_i(t)$  e que pode ser descrito por:

$$\psi(t) = x_r(t) + jx_i(t) \quad (33)$$

A componente em quadratura  $x_i(t)$  é a Transformada de Hilbert do sinal original  $x_r(t)$ , definida por:

$$x_i(t) = \frac{1}{\pi} \otimes x_r(t) \quad (34)$$

onde  $\otimes$  é o operador convolução. O envelope  $E(t)$  do sinal real  $x_r(t)$  é dado pelo módulo do sinal analítico:

$$E(t) = \sqrt{\psi(t)\psi^*(t)} = \sqrt{x_r^2(t) + x_i^2(t)} \quad (35)$$

sendo que  $\psi^*(t)$  é o complexo conjugado de  $\psi(t)$ . O envelope representa a amplitude instantânea do sinal analítico.

A transformada de Fourier do sinal analítico da Equação 33 é dada por:

$$\Psi(w) = X_r(w) + jX_i(w) \quad (36)$$

onde  $\Psi(w)$ ,  $X_r(w)$  e  $X_i(w)$  são os espectros correspondentes de  $\psi(t)$ ,  $x_r(t)$  e  $x_i(t)$  respectivamente. Por definição, o espectro de Fourier do sinal analítico  $\Psi(w)$  é nulo para frequências negativas.

$$\Psi(w) = 0 \quad \text{para } w < 0 \quad (37)$$

Desta forma, substituindo-se a Equação 37 em 36, é obtido:

$$X_i(w) = jX_r(w) \quad \text{para } w < 0 \quad (38)$$

A fase de uma função real é uma função ímpar, ou seja:

$$X_i(w) = -jX_r(w) \quad \text{para } w > 0 \quad (39)$$

Assim, combinando-se as equações 38 e 39, obtém-se:

$$X_i(w) = -j \operatorname{sgn}(w) X_r(w) = X_r(w) e^{-j \operatorname{sgn}(w) \frac{\pi}{2}} \quad (40)$$

Onde:

$$\operatorname{sgn}(w) = \frac{w}{|w|} = \begin{cases} 1 \dots \dots \dots \text{para } \dots \dots w > 0 \\ -1 \dots \dots \dots \text{para } \dots \dots w < 0 \end{cases} \quad (41)$$

Desta maneira, o espectro da componente em quadratura pode ser obtido realizando-se um avanço de  $-\pi/2$  na fase das componentes de Fourier de  $x_r(t)$ .

Substituindo-se a Equação 40 em 36 e suprimindo-se as componentes de frequência negativa, obtém-se uma expressão para determinar o espectro de um sinal analítico:

$$\Psi(w) = X_r(w)[1 + \operatorname{sgn}(w)] = 2X_r(w)H(w) \quad (42)$$

onde  $H(w)$  é a função de Heaviside que assume valores 0 e 1 para  $w < 0$  e  $w > 0$ , respectivamente. É possível obter o sinal analítico  $\psi(t)$  aplicando-se a transformada inversa de Fourier ao espectro resultante da Equação 42.

Como a Transformada de Hilbert corresponde a um deslocamento de  $-\pi/2$  na fase do sinal original  $x_r(t)$ , o espectro de energia dos sinais  $x_r(t)$  e  $x_i(t)$  são iguais. A Figura 8 apresenta um sinal semelhante ao recebido por um transdutor de ultra-som com sua Transformada de Hilbert e o envelope calculado utilizando-se a Equação 35. Pode-se verificar que o pico do envelope está entre os picos dos sinais  $x_r(t)$  e  $x_i(t)$ .

A técnica de cálculo do envelope demanda pouco tempo computacional e como o ponto de máximo pode ser facilmente identificado, esta permite a determinação do tempo de trânsito do sinal no meio de referência e no material a ser analisado (Figura 9) e, conseqüentemente, a velocidade de propagação em materiais dispersivos como o osso trabecular de forma mais fácil e precisa (LE, 1998).

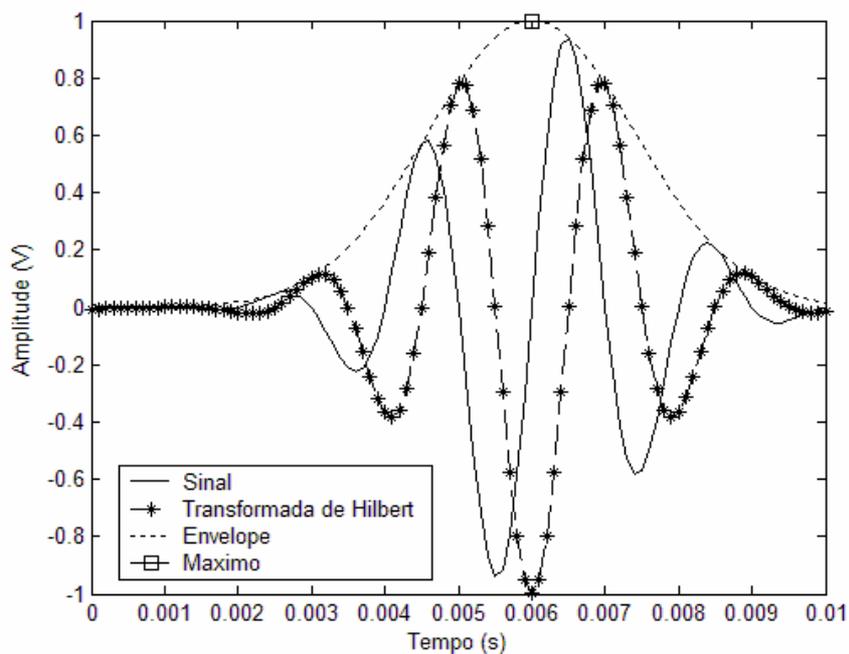


Figura 8 - Exemplo de sinal recebido por um transdutor de ultra-som mostrando o envelope, a Transformada de Hilbert e o ponto de máximo do mesmo.

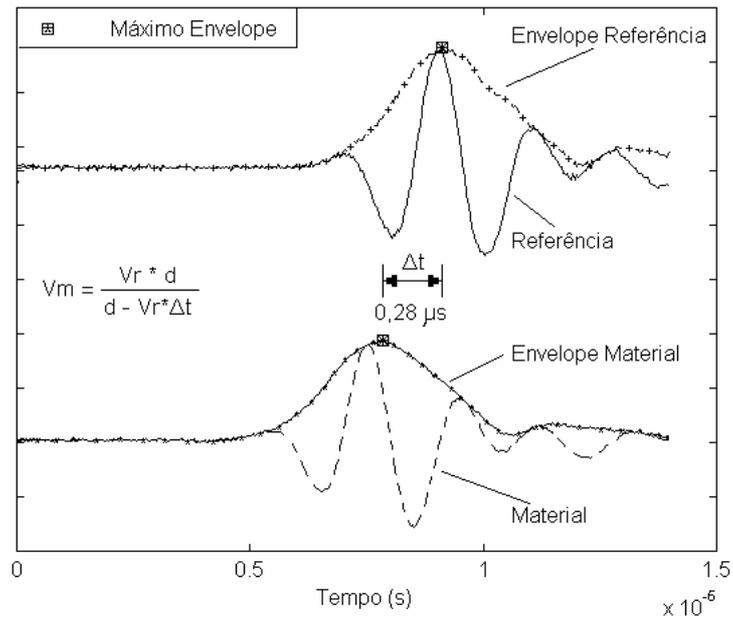


Figura 9 - Cálculo do tempo de propagação das ondas ultra-sônicas no meio de referência e no material a ser analisado utilizando-se a técnica do envelope. A diferença entre os tempos de propagação ( $\Delta t$ ) pode ser utilizada para determinar a velocidade de propagação no material ( $V_m$ ) a ser analisado, conhecendo-se a dimensão ( $d$ ) do mesmo e a velocidade de propagação no meio de referência ( $V_r$ ).

## CAPÍTULO 3

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo é apresentada a descrição completa do sistema de aquisição pulso-eco/transmissão-recepção desenvolvido. Esta descrição está dividida em duas partes, sendo uma destinada ao *hardware* e a outra aos *softwares* de controle e processamento do sistema.

Para a concepção e desenvolvimento do sistema foi definida a especificação de requisitos. Esta especificação é apresentada a seguir e teve como base o trabalho apresentado por MAIA (2001), definindo os parâmetros necessários para a aquisição, processamento e estudos dos sinais ultra-sônicos:

- 1) Indicação do estado do equipamento e configurações através de um *display* de cristal líquido e 2 LEDs;
- 2) Controle das funções do sistema através de 4 chaves tipo *push-bottom*;
- 3) Comunicação serial através de interface USB;
- 4) Seleção de taxa de amostragem entre 5 MHz e 80 MHz;
- 5) Controle da frequência de repetição dos pulsos gerados com sincronismo interno entre 111Hz a 333Hz, ou pulso único;
- 6) Seleção dos ganhos dos circuitos da unidade de recepção entre -40 dB a +40 dB;
- 7) Controle de sincronismo com atraso programável;
- 8) Dois modos de operação configuráveis – transmissão-recepção ou pulso-eco;
- 9) Permitir testes de ultra-som com transdutores em posição fixa ou varredura de área quadrada entre 1 a 25 cm<sup>2</sup> com resolução de 1 a 5 mm;
- 10) Cálculo dos parâmetros de velocidade de propagação e atenuação das ondas ultra-sônicas, e medida do BUA de diferentes materiais.

Em conjunto com a especificação dos requisitos, foi escolhida como placa mãe do sistema, a DSK (DSP *Starter Kit*) TMS320VC5416DSP. Além de atender todos os pré-requisitos de *hardware* e elevado desempenho, o Laboratório de Engenharia Biomédica da UTFPR já dispunha de duas unidades do *kit* para a realização de projetos. Utilizando como base o *kit*, foi realizada uma pesquisa sobre os módulos de *hardware* e componentes necessários para o projeto.

Os módulos sem componentes SMD (*Surface Mounted Device*) e os circuitos das fontes de tensão foram testados em bancada e otimizados antes do desenvolvimento das placas de circuito impresso protótipos.

A Figura 10 mostra o diagrama em blocos do sistema completo de aquisição. O equipamento funciona em Modo A<sup>1</sup>, composto basicamente por três placas de circuito impresso: placa DSK TMS320VC5416, placa Interface\_V1 e placa Driver\_V1. A primeira é a placa mãe DSK TMS320VC5416, que utiliza o DSP (*Digital Signal Processor*) TMS320VC5416, para o controle e gerenciamento dos circuitos do sistema e permite a comunicação com um microcomputador via uma interface USB (*Universal Serial Bus*). A segunda é a placa filha Interface\_V1, interligada à placa mãe através de dois conectores de expansão, sendo composta pelos circuitos da lógica de apoio e controle, unidade de transmissão e geração dos pulsos elétricos de alta amplitude para excitação do transdutor, unidade de recepção com circuitos de proteção e amplificação, conversor A/D (análogo para digital) de alta velocidade, memória FIFO (*First-In-First-Out*) para armazenamento do *buffer* de dados digitalizados, *display* de cristal líquido (LCD - *Liquid Crystal Display*) para a apresentação das informações do sistema, LEDs (*Light Emitting Diode*) e *buzzer* para sinalização, chaves tipo *push-bottom* para seleção de funções e configurações, e conectores de expansão para conexão de até três placas de potência Driver\_V1, para acionamento de motores de passo. Além da fonte de alimentação que acompanha o *kit* da placa DSK, foram montadas duas fontes de alimentação separadas, sendo uma para os circuitos de controle com faixa de tensão entre -12 V e +12 V, e outra para o circuito de transmissão com tensão de +200 V.

---

<sup>1</sup> O modo A também é conhecido como Modo Amplitude. Neste modo, os equipamentos têm como base a técnica pulso-eco, onde um pulso ultra-sônico de curta duração é gerado por um transdutor, propaga-se através do meio que está sendo investigado e toda vez que há uma mudança da impedância acústica, ocorrem reflexões e estas podem ser captadas pelo mesmo transdutor, agora operando como receptor. O tempo gasto entre a transmissão e a recepção do eco é proporcional à profundidade de penetração no meio, o que possibilita o mapeamento unidimensional das interfaces na linha de propagação do campo acústico.

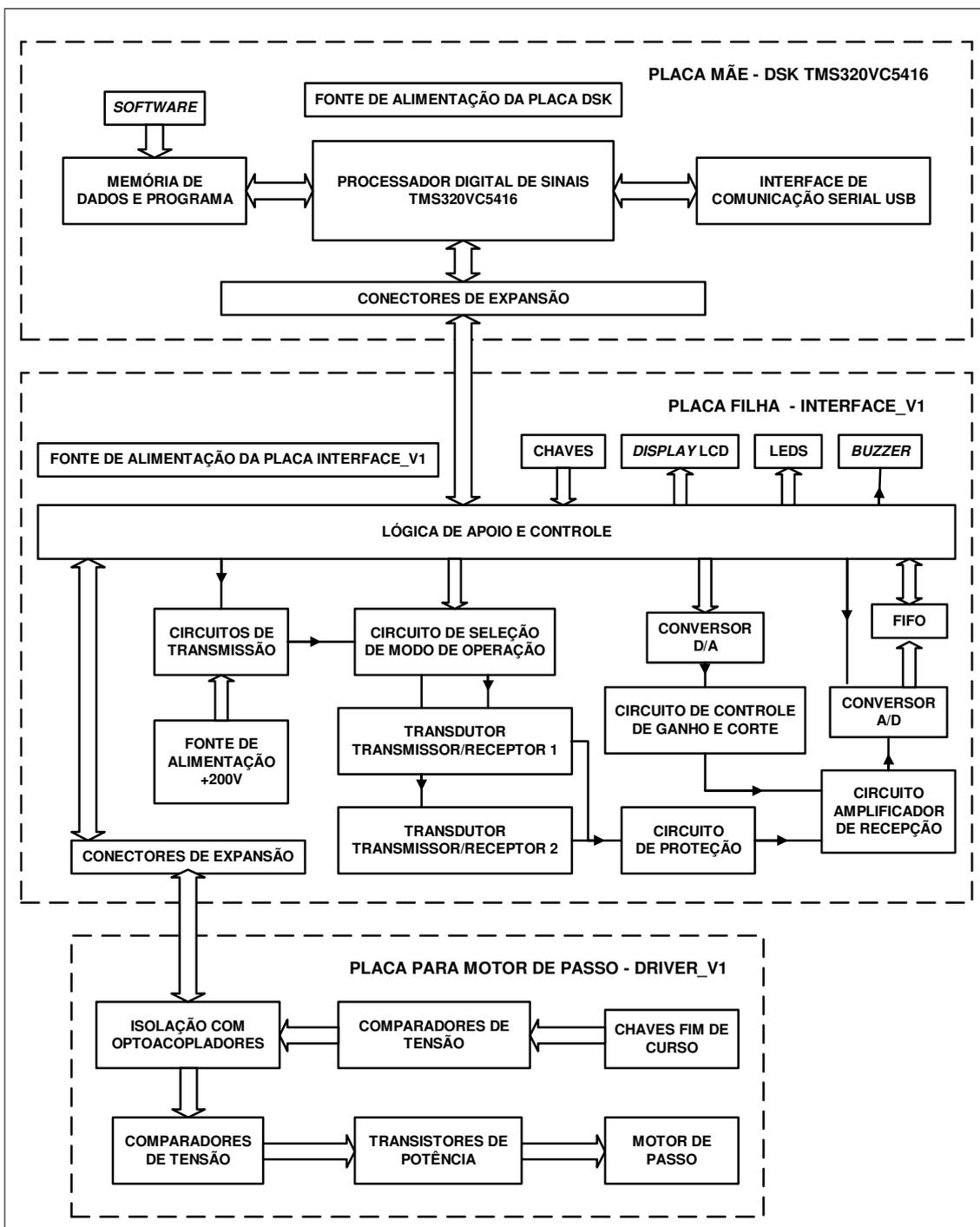


Figura 10 - Diagrama em blocos do sistema de aquisição.

A seguir são apresentados os esquemas e descrita cada uma das unidades que compõem o sistema.

### 3.1 UNIDADE DE CONTROLE DIGITAL

A unidade de controle digital é responsável pela execução das tarefas de controle dos circuitos de transmissão e recepção, gerenciamento da entrada de comandos e configurações, realizadas de forma local através de duas chaves, apresentação das informações do sistema em um LCD, sinalização dos LEDs e *buzzer*, geração da frequência de amostragem entre a faixa de 5 MHz a 80 MHz para o conversor A/D e memória FIFO, e sincronismo para leitura da memória FIFO. Para a unidade de controle foi utilizada a placa de desenvolvimento DSK TMS320VC5416, com o DSP TMS320VC5416, como placa mãe, interligada através de dois conectores de expansão à placa filha Interface\_V1, desenvolvida com os demais módulos do sistema. A Figura 11 apresenta o diagrama em blocos da configuração básica da unidade de controle do sistema.

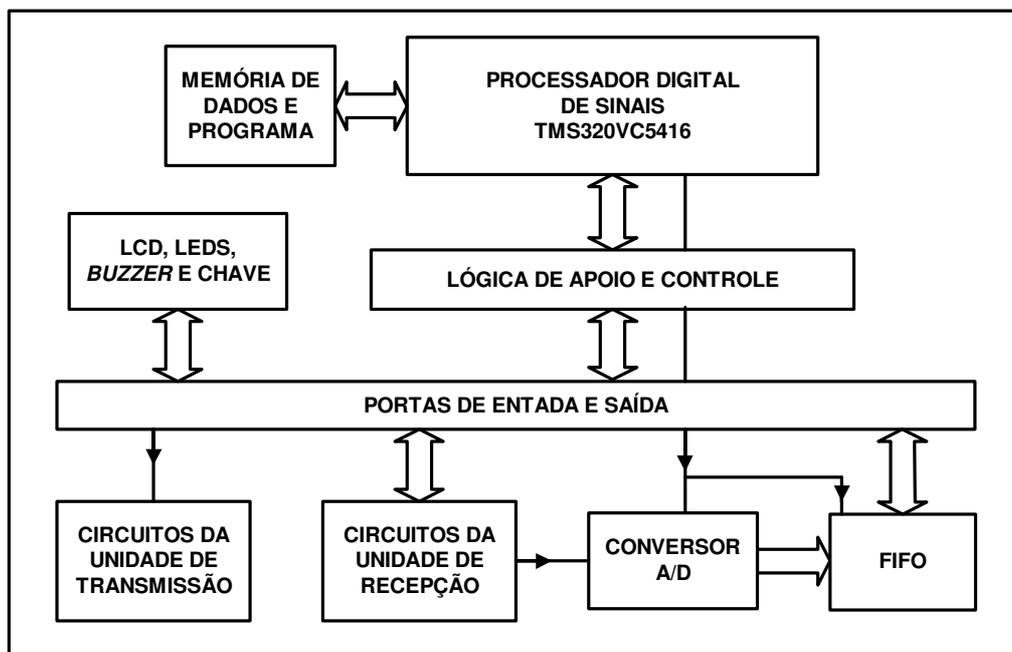


Figura 11 – Diagrama em blocos dos circuitos de controle do sistema.

#### 3.1.1 Placa de desenvolvimento DSK TMS320VC5416

A placa DSK TMS320VC5416, apresentada no diagrama em blocos da Figura 12, é o elemento central do *kit* produzido pela empresa Spectrum Digital para o auxílio no desenvolvimento de sistemas utilizando o DSP TMS320VC5416, da Texas Instruments. Esse

*kit* é formado pela placa DSK, fonte de alimentação de +5 V, cabo USB e CD de instalação do *software* Code Composer que é utilizado para o desenvolvimento do código fonte de programa.

A placa de desenvolvimento pode operar com frequência de *clock* entre 16 e 160 MHz, possui barramento de dados de 16 *bits*, 64 k *words*<sup>2</sup> de SRAM (*Static RAM*), 256 k *words* de *Flash ROM* para gravação de programas, três conectores de expansão com interface para memórias, periféricos e HPI (*Host-Port-Interface*), quatro LEDs, quatro chaves tipo *dip-switch*, conector opcional para emulação JTAG padrão IEEE 1149.1 e um circuito integrado *stereo codec* PCM 3002. Todas as decodificações das memórias e periféricos externos são realizadas via um dispositivo lógico programável complexo (CPLD – *Complex Programmable Logic Device*) controlado pelo DSP.

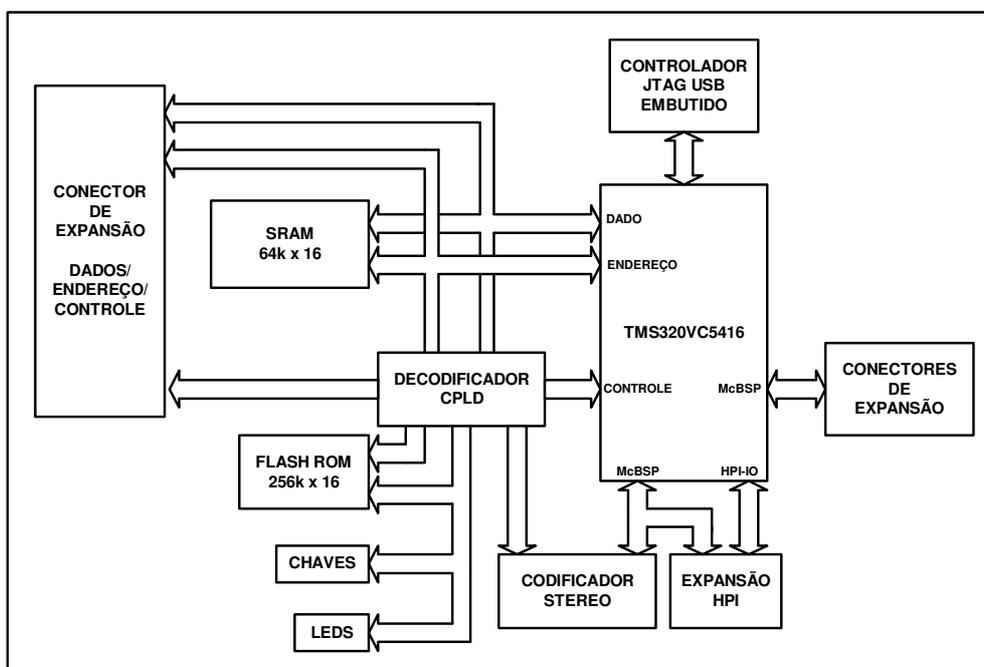


Figura 12 – Diagrama em blocos da placa DSK TMS320VC5416. Adaptado de: [SPECTRUM DIGITAL \(2002\)](#).

<sup>2</sup> O termo *words* é utilizado para indicar que o tamanho da informação que pode ser armazenada em cada endereço de memória é de 16 *bits*.

### 3.1.1.1 Processador Digital de Sinais TMS320VC5416

O DSP TMS320VC5416, mostrado no diagrama em blocos da Figura 13, é um processador digital de sinais de ponto fixo baseado em uma arquitetura modificada de *Harvard* de multibarramentos, com três barramentos separados de 16 bits para memória de dados e um barramento de memória de programa (TEXAS INSTRUMENTS, 2004).

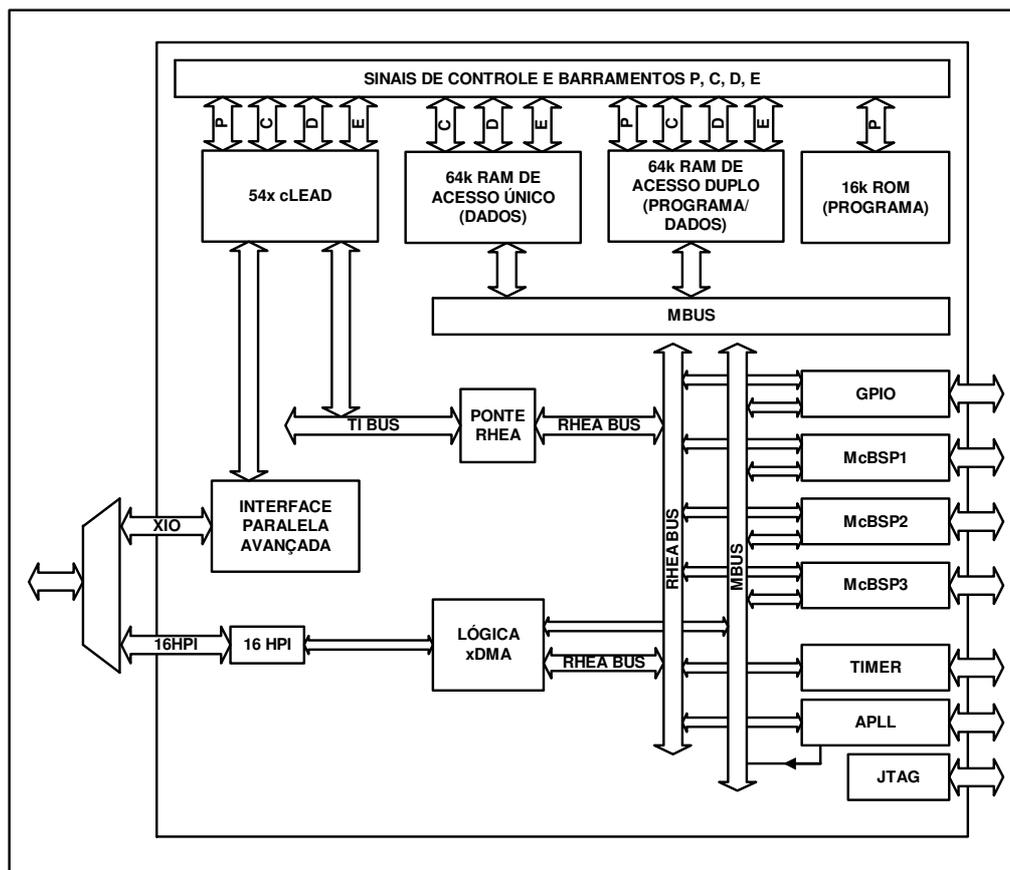


Figura 13 - Diagrama em blocos funcional do DSP TMS320VC5416. Adaptado de: [TEXAS INSTRUMENTS \(2004\)](#).

Como características, o TMS320VC5416 pode operar com frequência nominal do barramento interno de 160 MHz quando alimentado com tensão de +3,3 V, apresenta uma unidade lógico-aritmética (ULA) com alto grau de paralelismo, instruções lógicas para aplicações específicas realizadas por *hardware*, memória ROM interna de programa de 16 *keywords*, modo de endereçamento de memória de programa externa estendido até 8 M *words*, e 128 k *words* de memória RAM interna divididos em 8 blocos de 8 k *words* de RAM de acesso duplo de dado ou programa (DARAM) e 8 k *words* de RAM de acesso único para programa

(SARAM). Possui como interfaces um temporizador de 16 bits, controlador de acesso direto à memória (DMA) com seis canais, três portas de comunicação serial MCBSP (*Multichannel Buffered Serial Port*), gerador de *clock* de PLL (*Phase-Locked-Loop*) e interface avançada de 8 ou 16 bits HPI.

### 3.1.1.2 Memória de programa

O programa que o DSP deve executar pode ser gravado na memória de programa interna ou externa. Quando as instruções estão mapeadas na memória de programa interna, o dispositivo acessa automaticamente as posições internas de memória e não precisa gerar estados de espera. Quando o registro de geração de endereçamento de programa (PAGEN) gera um endereço fora da faixa interna, o dispositivo automaticamente realiza um acesso externo e pode gerar estados de espera para sincronizar com componentes mais lentos, conforme a programação. O *bit* MP/MC (*Microprocessor/Microcontroller Mode*) é utilizado para habilitar ou desabilitar a ROM interna e corresponde ao nível lógico no pino MP/MC amostrado após o *reset*. Em nível lógico 0, a ROM interna é habilitada e endereçável, com o DSP operando em modo microcontrolador, e em nível lógico 1 fica indisponível, operando em modo microprocessador, somente com memória de programa externa. O *bit* OVLY (*RAM overlay*) é utilizado para habilitar o mapeamento dos blocos da RAM de dados de acesso duplo (DARAM) para memória de programa. Em nível lógico 0, a RAM interna é mapeada somente para dados, enquanto em 1 é mapeada para dados e memória de programa. O mapa da memória de programa é mostrado na Figura 14. Na placa DSK, é disponibilizada 256k *words* de memória de programa e dados. A memória *Flash* é dividida em 8 blocos de 32k *words* na faixa de endereço entre 8000 h e FFFF h, e o dispositivo CPLD seleciona a página que deve ser acessada.

O endereçamento de memória de programa externa é realizado através de 23 pinos, totalizando 8192 k *words*. Para realizar o acesso a memória de programa externa é utiliza a técnica de paginação. Nessa técnica a memória de programa é organizada em 128 páginas com comprimento de 64 k *words*, sendo que o valor do registro mapeado na memória de dados interna, XPC, define a página a ser utilizada, conforme a Figura 15.

No TMS320VC5416, é disponível um programa *bootloader*, residente em uma área de 16 k *word*, entre C000 h e FEFF h, na ROM interna mascarável, mapeado somente na memória de programa. Esse programa pode ser utilizado para transferir automaticamente o

código do usuário de uma fonte externa para qualquer posição na memória de programa após a alimentação do DSP. Caso o pino MP/MC, amostrado durante o *reset* do *hardware*, apresente nível lógico 0, a execução do programa será iniciada no endereço FF80 h da ROM interna. Esta posição contém uma instrução de desvio para o início do programa *bootloader*. O programa do usuário pode ser carregado de forma paralela em 8 ou 16 *bits* a partir de uma memória EPROM, ou uma interface de entrada e saída (E/S) serial via as portas de comunicação serial de 8 ou 16 *bits* ou através da interface HPI.

### 3.1.1.3 Memória de dados

O TMS320VC5416 possui 64k *words* de RAM de acesso duplo (DARAM) e 64k *words* de RAM de acesso único (SARAM). A DARAM é composta por oito blocos de 8k *words* cada. Cada bloco pode suportar duas leituras em um ciclo, ou uma leitura e uma escrita em um ciclo. Quatro blocos da DARAM são localizados entre os endereços 80 h e 7FFF h na memória de dados, e podem ser mapeados na memória de programa escrevendo nível lógico 1 no *bit* OVLY, conforme a Figura 15. Os outros quatro blocos da DARAM estão localizados entre os endereços 18000 h e 1FFFF h na memória de programa, e podem ser mapeados na memória de dados escrevendo nível lógico 1 no *bit* DROM. A SARAM possui o mesmo tamanho que a DARAM, porém cada bloco possui acesso único, isto é, duas leituras em um ciclo, ou uma leitura e uma escrita em um ciclo só podem ser realizadas em blocos de memória diferentes. A SARAM está localizada entre os endereços 28000 h e 2FFFF h, e 38000 h e 3FFFF h na memória de programa.

A placa DSK utiliza 64 k *words* de SRAM mapeada na área de programa e dados. A memória é dividida em duas páginas de 32 k *words* mapeadas entre os endereços 8000 h e FFFF h, sendo que o CPLD seleciona a página corrente.

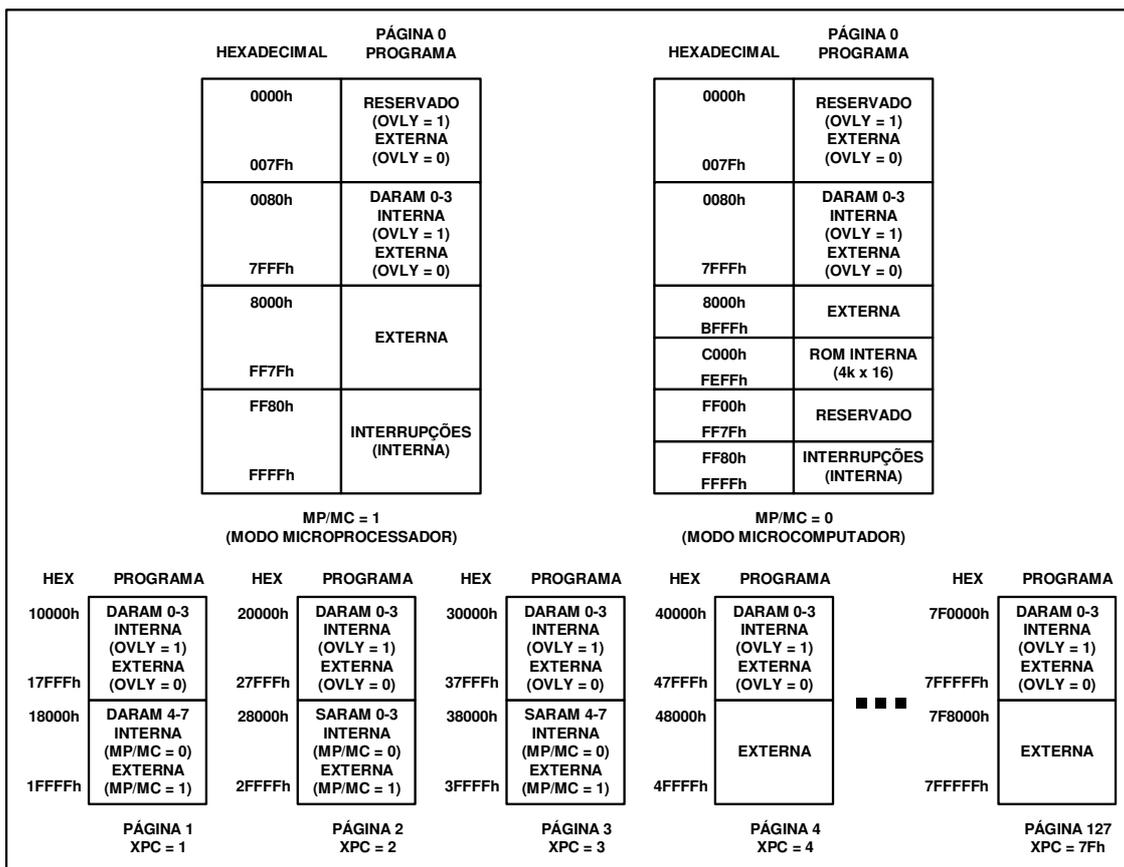


Figura 14 – Mapa da memória de programa da placa DSK TMS320VC5416. Adaptado de: [SPECTRUM DIGITAL \(2002\)](#).

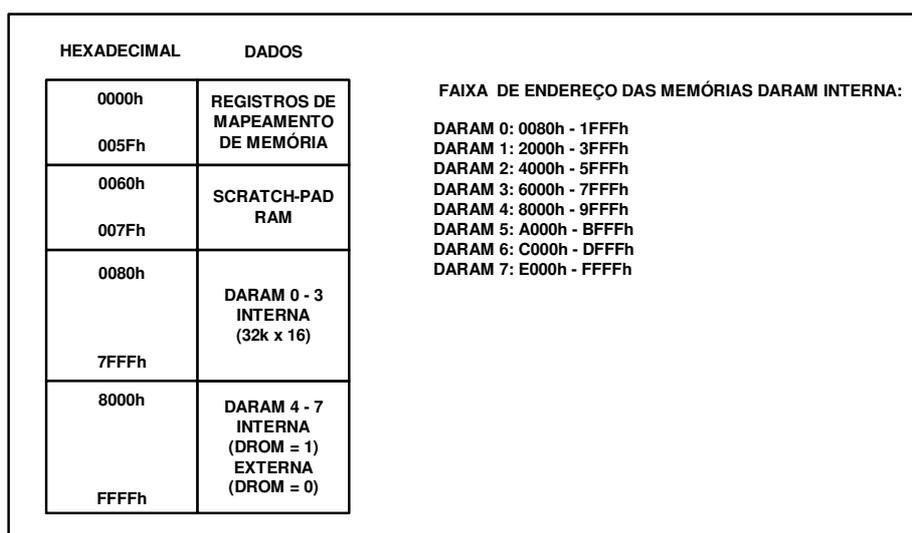


Figura 15 – Mapa da memória de dados da placa DSK TMS320VC5416. Adaptado de: [SPECTRUM DIGITAL \(2002\)](#).

### 3.1.1.4 Endereçamento de dispositivos de entrada e saída

Na placa DSK o mapeamento dos endereços de entrada e saída, apresentado na Figura 16, permite o acesso ao circuito CPLD e aos conectores de expansão para interface com a placa filha. A placa utiliza 8 endereços para acesso ao dispositivo CPLD que realiza a decodificação e sinalização para o endereçamento das memórias na placa, LEDs, chaves *dip-switch* e do circuito *stereo code*, e entre a faixa dos endereços 8000 h a FFFF h para endereçamento de dispositivos de E/S para placa filha via os conectores de expansão.

HEXADECIMAL	ENTRADA / SAÍDA (E/S)
0000h	REGISTROS DE CONFIGURAÇÃO DO CPLD
0007h	
0008h	RESERVADO
7FFFh	
8000h	ACESSO A PLACA FILHA
FFFFh	

Figura 16 – Mapa de endereços dos dispositivos periféricos de entrada e saída (E/S).

### 3.1.2 Placa Interface\_V1

Na placa filha Interface\_V1 a unidade de controle digital é representada pelos circuitos da lógica de apoio e controle, que são utilizados para endereçar, através das portas de entrada e saída, os circuitos de transmissão, recepção, memória FIFO e motores de passo, além do gerenciamento da entrada de comandos e sinalização através de chaves, LCD, LEDs e *buzzer*. O circuito esquemático completo implementado para a placa Interface\_V1 é apresentado no Apêndice A.

### 3.1.2.1 Lógica de Apoio e Controle

A lógica de apoio e controle (Figura 17) é constituída por um decodificador 74LVC138 (U14), dois *latches* 74AVC16374 (U6 e U11) e um *buffer* 74AVC16244 (U13) de 16 *bits*, sensíveis à borda de descida, todos alimentados com tensão de +3,3 V.

O decodificador 74LVC138 é habilitado quando o DSP realiza uma operação de escrita ou leitura de um dispositivo periférico de E/S entre os endereços 8000 h e 8003 h (pino de endereço DC\_A15 em nível lógico 1), gerando automaticamente as sinalizações dos pinos DC\_IS e DC\_IOSTRB, conforme o diagrama de tempo da Figura 18. O pino DC\_WE, conectado à entrada de seleção mais significativa do decodificador, sinaliza quando o DSP está lendo (DC\_WE = 1) ou escrevendo (DC\_WE = 0) no barramento de dados, com endereço indicado pelos pinos DC\_A0 e DC\_A1.

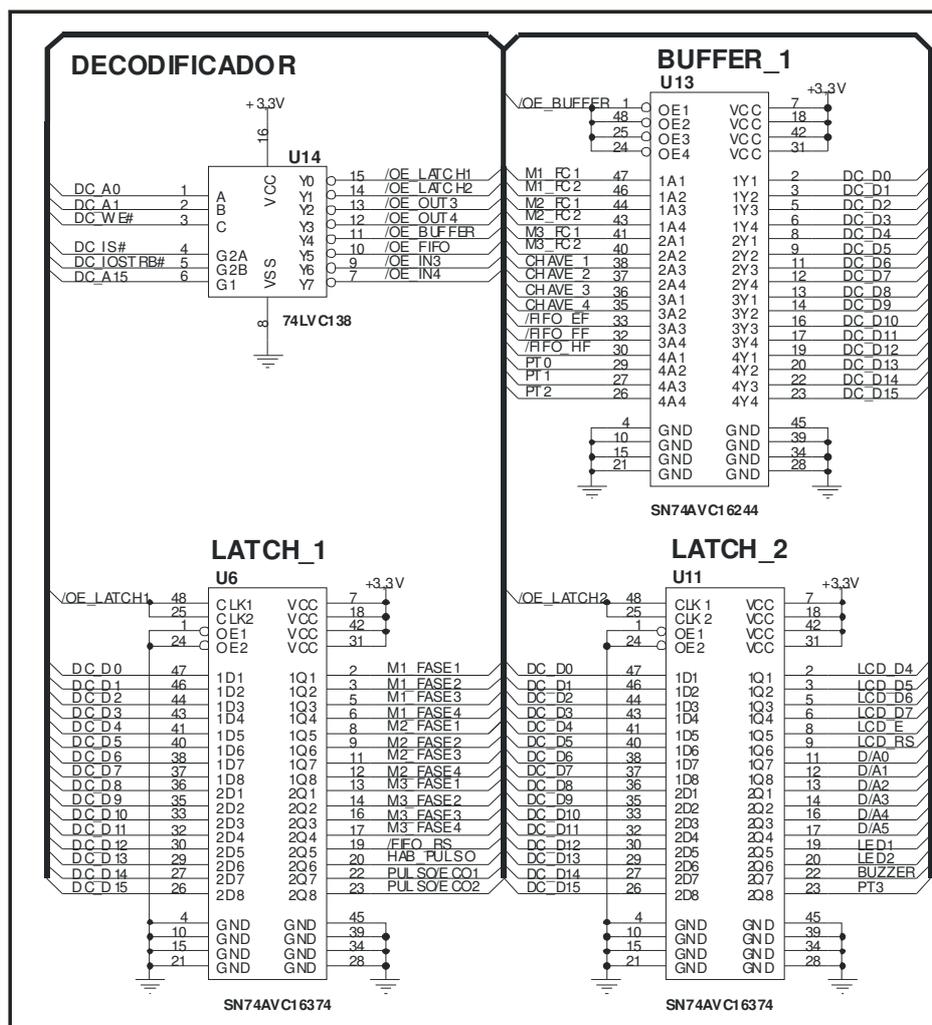


Figura 17 - Circuitos da lógica de apoio e controle.

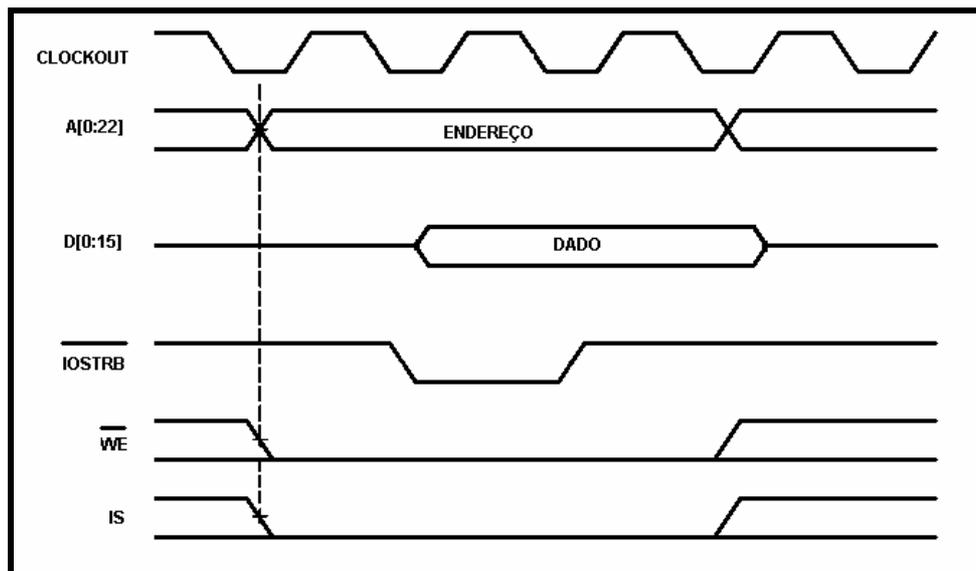


Figura 18 - Diagrama de tempos do barramento do TMS30VC5416 para acesso a escrita em periférico. Adaptado de: [TEXAS INSTRUMENTS \(2004\)](#).

O circuito decodificador 74LVC138 pode endereçar até 8 periféricos, porém para o sistema são utilizadas somente duas saídas (Y0 e Y1) para habilitação dos *latches* 1 (U6) e 2 (U11), que funcionam como portas de saída de dados, e duas para as portas de entrada (Y4 e Y5) para habilitação do *buffer* 1 (U13) e do *buffer* interno da FIFO (U9), conforme é apresentado na Tabela 4. O *latch* 1 tem a função de realizar o controle dos três motores de passo que podem ser utilizados no sistema, *reset* da memória FIFO, pulso para excitação do transdutor transmissor e acionamento dos relés para seleção do modo de operação. O *latch* 2 é utilizado para controle do LCD, conversor D/A (digital para analógico), LEDs e *buzzer*. A porta de entrada de dados, representada pelo *buffer* 1 (U13), permite a leitura dos estados das chaves fim de curso para posicionamento dos transdutores através dos motores de passo, chaves de entrada de comandos e configurações e estados da memória FIFO. O sinal *buffer* FIFO é utilizado para habilitação do *buffer* de saída de dados interno da memória FIFO. As Tabelas 5, 6 e 7 mostram, de maneira resumida, a utilização dos *bits* dos *latches* 1 e 2, e do *buffer* 1, respectivamente.

Tabela 4 - Endereços das portas de entrada e saída de dados.

<b>Endereço em Hexadecimal</b>	<b>Pino de saída do 74LVC138</b>	<b>Portas</b>	<b>E/S</b>	<b>Circuito Integrado</b>
8000 h	Y0	<i>Latch 1</i>	S	74AVC16374
8001 h	Y1	<i>Latch 2</i>	S	74AVC16374
8002 h	Y2	Livre	S	-
8003 h	Y3	Livre	S	-
8004 h	Y4	<i>Buffer 1</i>	E	74AVC16244
8005 h	Y5	<i>Buffer FIFO</i>	E	74V245
8006 h	Y6	Livre	E	-
8007 h	Y7	Livre	E	-

Tabela 5 – Descrição resumida das funções dos *bits* do *latch 1*.

<b>Sinais</b>	<b>Função</b>
	Acionamento das fases 1, 2, 3 e 4 (y) dos motores de passo 1, 2 e 3 (x)
Mx_FASEy	0 – Fase desligada 1 – Fase ligada
	<i>Reset</i> da memória FIFO
/FIFO_RS	0 – FIFO em estado de <i>reset</i> 1 – FIFO operando normalmente
HAB_PULSO	Disparo do circuito monoestável da unidade de transmissão, por borda de subida do sinal (0 → 1), para a excitação do transdutor transmissor
	Seleção do transdutor transmissor
PULSO/ECO1	0 – Transdutor 1 (T1) operando como transmissor 1 – Transdutor 2 (T2) operando como transmissor
	Seleção do transdutor receptor
PULSO/ECO2	0 – T1 operando como receptor 1 – T2 operando como receptor

Tabela 6 - Descrição resumida das funções dos *bits* do *latch* 2.

<b>Sinais</b>	<b>Função</b>
LCD_D4-LCD_D7 LCD_E - LCD_RS	Controle do LCD
D/A0 – D/A5	Controle do barramento do conversor D/A
	Sinalização visual das operações do sistema
LED1 - LED2	0 – LED aceso 1 – LED apagado
BUZZER	Sinalização sonora das operações do sistema através do chaveamento da alimentação do <i>buzzer</i> na frequência de 1 kHz

Tabela 7 - Descrição resumida das funções dos *bits* do *buffer* 1.

<b>Sinais</b>	<b>Função</b>
Mx_FC1 Mx_FC2	Identificar o estado das duas chaves fim de curso para cada motor de passo 1, 2 ou 3 (x) 0 – Ocorreu fim de curso 1 – Não ocorreu fim de curso
CHAVE1 – CHAVE4	Identificar os estados das chaves 0 – Chave fechada (pressionada) 1 – Chave aberta
/FIFO_EF	Identifica quando a memória FIFO está vazia (sem dados gravados) 0 – FIFO vazia 1 – FIFO com pelo menos 1 endereço com informação
/FIFO_FF	Identificar quando a memória FIFO cheia 0 – FIFO cheia com todos os endereços utilizados 1 – FIFO com endereços livres
/FIFO_HF	Identifica quando a memória FIFO está meio cheia 0 – ocupação dos endereços da memória FIFO $\geq 2048$ 1 – ocupação dos endereços da memória FIFO $< 2048$

### 3.1.2.2 Chaves de entrada e LCD

A entrada de comandos e seleção de parâmetros é realizada através de quatro chaves do tipo *push-bottom* (Figura 19(a)). O DSP faz a varredura das chaves a cada 100 ms através da leitura do *buffer* 1 (U13), no endereço 8004h. Cada chave, em estado normal, permanece em nível lógico 1 e quando pressionada muda para nível 0.

Para as informações de configuração e controle do sistema foi utilizado um LCD de 16 colunas e duas linhas com *backlight*, padrão Hitashi HD44780. O DSP comanda o LCD através do *latch* 2 (U11), no endereço 8001h. Como o LCD funciona com tensão de +5 V, foi utilizado o circuito integrado 4504 (U18) para realizar a conversão da tensão de +3,3 V, da saída do *latch*, para +5 V. O LCD possui barramento de dados de 8 *bits*, porém para diminuir o número de trilhas na placa Interface\_V1 e simplificar o circuito foi utilizado o modo de comunicação de 4 *bits*, acessando os pinos mais significativos DISPLAY\_4 ao DISPLAY\_7 do barramento, conforme a Figura 19(b).

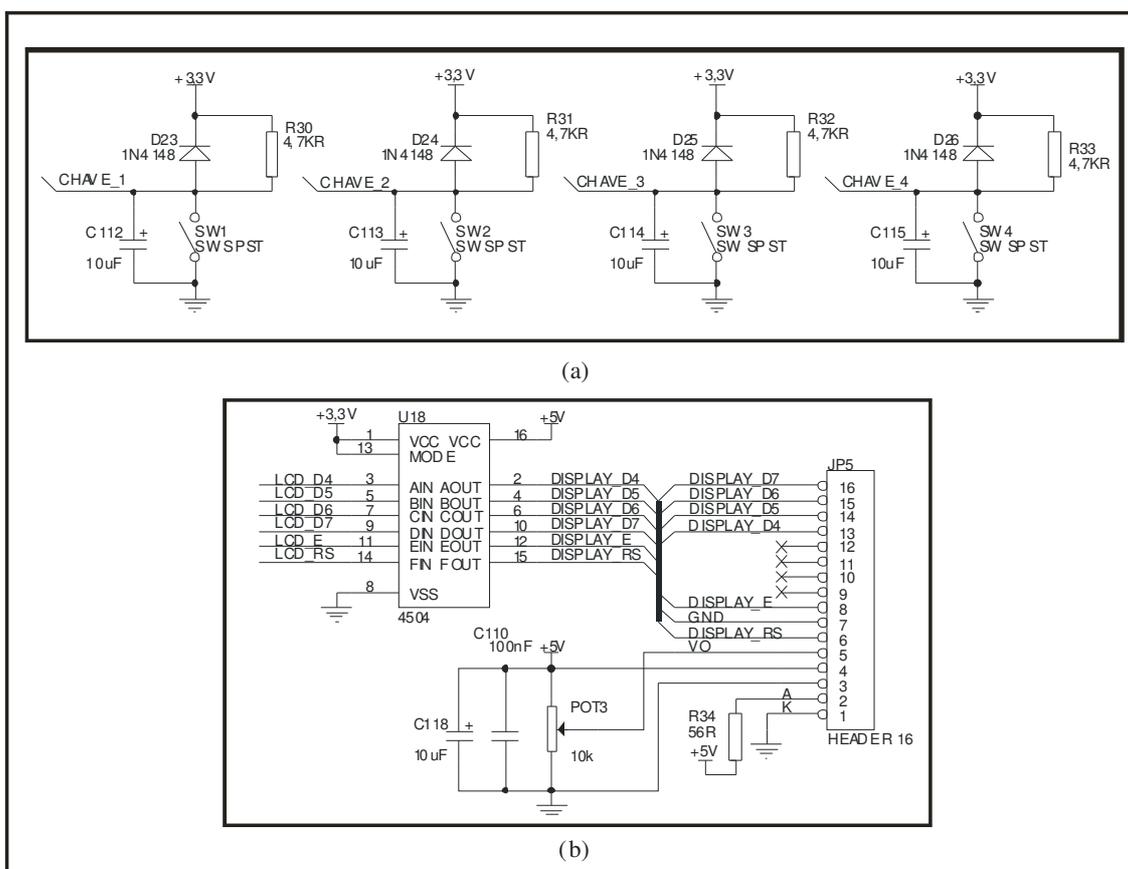


Figura 19 – (a) Circuitos das chaves de entrada tipo *push-bottom*; (b) Circuito de conexão com o LCD 16x2 padrão Hitashi HD44780.

Para evitar a necessidade de um circuito conversor de tensão de +5 V para +3,3 V, o pino R/W está conectado no ponto de referência de 0 V permitindo somente a escrita de dados ou instruções. O ajuste do ângulo de visão e contraste é realizado pelo *trimpot* POT3 de 10k $\Omega$ . A Tabela 8 mostra a descrição da pinagem do LCD e dos respectivos sinais.

Tabela 8 – Descrição da pinagem do LCD

<b>Pino</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Sinal</b>	<b>Função</b>
1	Vss	GND	0 V (Terra)
2	Vdd	+5V	+5 V Tensão positiva de alimentação
3	Vo	Vo	Tensão para controle do contraste
4	RS	DISPLAY_RS	Seleção do tipo da informação 0 – Instrução 1 – Dado
5	R/W	GND	Seleção do tipo de operação 0 – Escrita (CPU para LCD) 1 – Leitura (LCD para CPU)
6	E	DISPLAY_E	Seleção do <i>chip</i> Nível lógico 0 – Desabilitado Nível lógico 1 ou 1→0 – Habilitado
7	DB0	Não conectado	Via de dados 0 ( <i>bit</i> menos significativo – LSB)
8	DB1	Não conectado	Via de dados 1
9	DB2	Não conectado	Via de dados 2
10	DB3	Não conectado	Via de dados 3
11	DB4	DISPLAY_D4	Via de dados 4
12	DB5	DISPLAY_D5	Via de dados 5
13	DB6	DISPLAY_D6	Via de dados 6
14	DB7	DISPLAY_D7	Via de dados 7 ( <i>bit</i> mais significativo – MSB)
15	A	GND	Anodo do <i>backlight</i>
16	K	+5 V	Catodo do <i>backlight</i>

### 3.1.2.3 Sinalização dos LEDs e *buzzer*

Além do LCD a sinalização visual é realizada por meio de 2 LEDs verdes. Quando o *software* da placa estiver funcionando o LED 1 permanece piscando com intervalo de 200 ms. O LED 2 é aceso somente quando a placa está realizando o teste de ultra-som. O *buzzer* representa a sinalização sonora do sistema. Quando uma chave ativa for pressionada o *buzzer* é acionado por 50 ms, oscilando em uma frequência de 1 kHz. Os LEDs e o *buzzer* podem ser acessados quando o DSP realiza uma operação de escrita em periférico no endereço 8001 h, habilitando o *latch* 2. O acionamento dos circuitos é realizado com a aplicação de nível lógico 1 na base dos transistores BC546, mostrados na Figura 20.

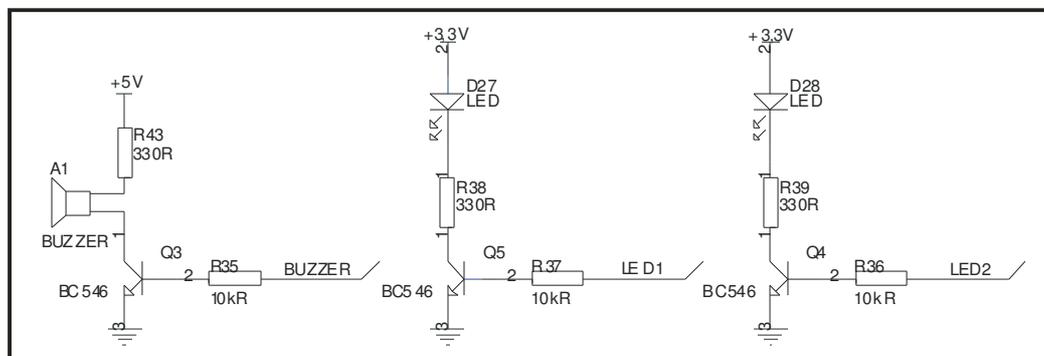


Figura 20 – Circuito de acionamento dos LEDs e *buzzer*.

## 3.2 UNIDADE DE TRANSMISSÃO

A unidade de transmissão foi projetada para gerar e transmitir os pulsos de alta amplitude que excitam o transdutor transmissor, com frequência de repetições e no modo de operação transmissão-recepção ou pulso-eco configuráveis através das chaves de comando. A Figura 21 mostra o diagrama em blocos dos circuitos de transmissão e a Figura 22 o circuito implementado. Essa unidade é composta por um circuito de disparo, *buffer* conversor de nível lógico, *driver* de corrente, circuito de potência, circuito de seleção dos transdutores e circuito de corte. A taxa de transmissão dos pulsos é controlada pelo DSP na faixa entre 111 Hz e 333 Hz.

A entrada da unidade de transmissão é representada pelo circuito de disparo. Esse circuito é composto por um multivibrador na configuração monoestável que recebe o

comando da unidade de controle e gera um pulso estreito, com largura aproximada de 70 ns. Esse pulso é aplicado ao circuito formado por um *buffer* de tensão e um *driver* de corrente que condicionam o sinal para disparar um transistor de potência acoplado a uma fonte de tensão de +200 V, para geração dos pulsos de alta amplitude. A saída do circuito de potência é aplicada ao circuito de seleção dos transdutores, composto por dois relés de dois contatos cada, permitindo que os transdutores possam operar em modo transmissão-recepção ou pulso-eco, conforme a configuração do sistema. Em ambos os modos o transdutor de recepção fica conectado ao circuito de proteção da unidade de recepção. Além disso, o primeiro multivibrador também gera o sinal de sincronismo para o disparo do segundo circuito multivibrador monoestável que envia o sinal para o circuito de corte com pulso de largura aproximadamente 50 vezes maior que o pulso de transmissão, fazendo com que durante a geração do pulso de alta amplitude o estágio de recepção atenuem em 40 dB o sinal na sua entrada, evitando que o amplificador do estágio de recepção seja saturado.

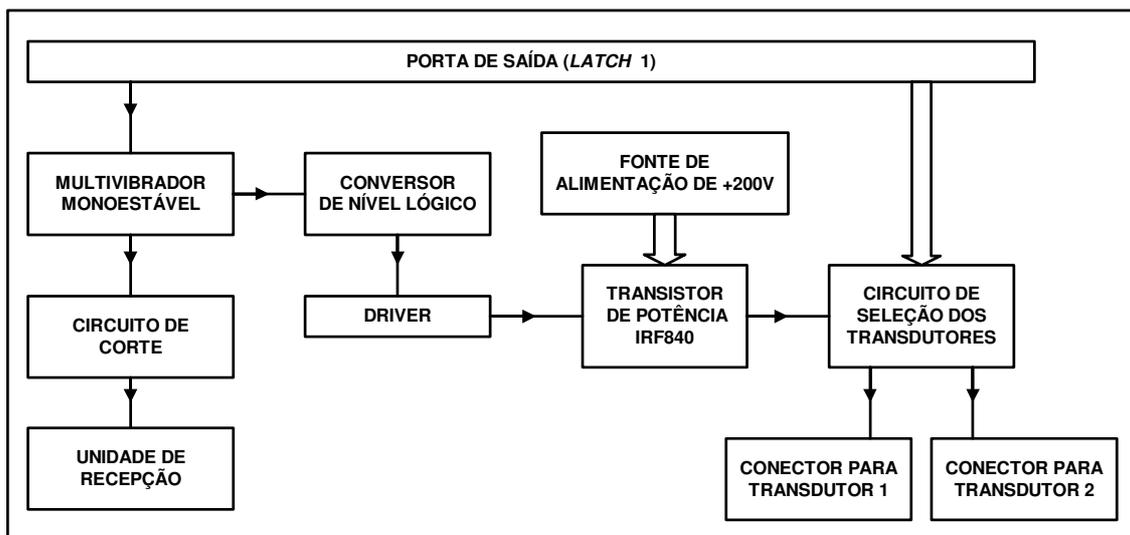


Figura 21 – Diagrama em blocos da unidade de transmissão de pulsos.

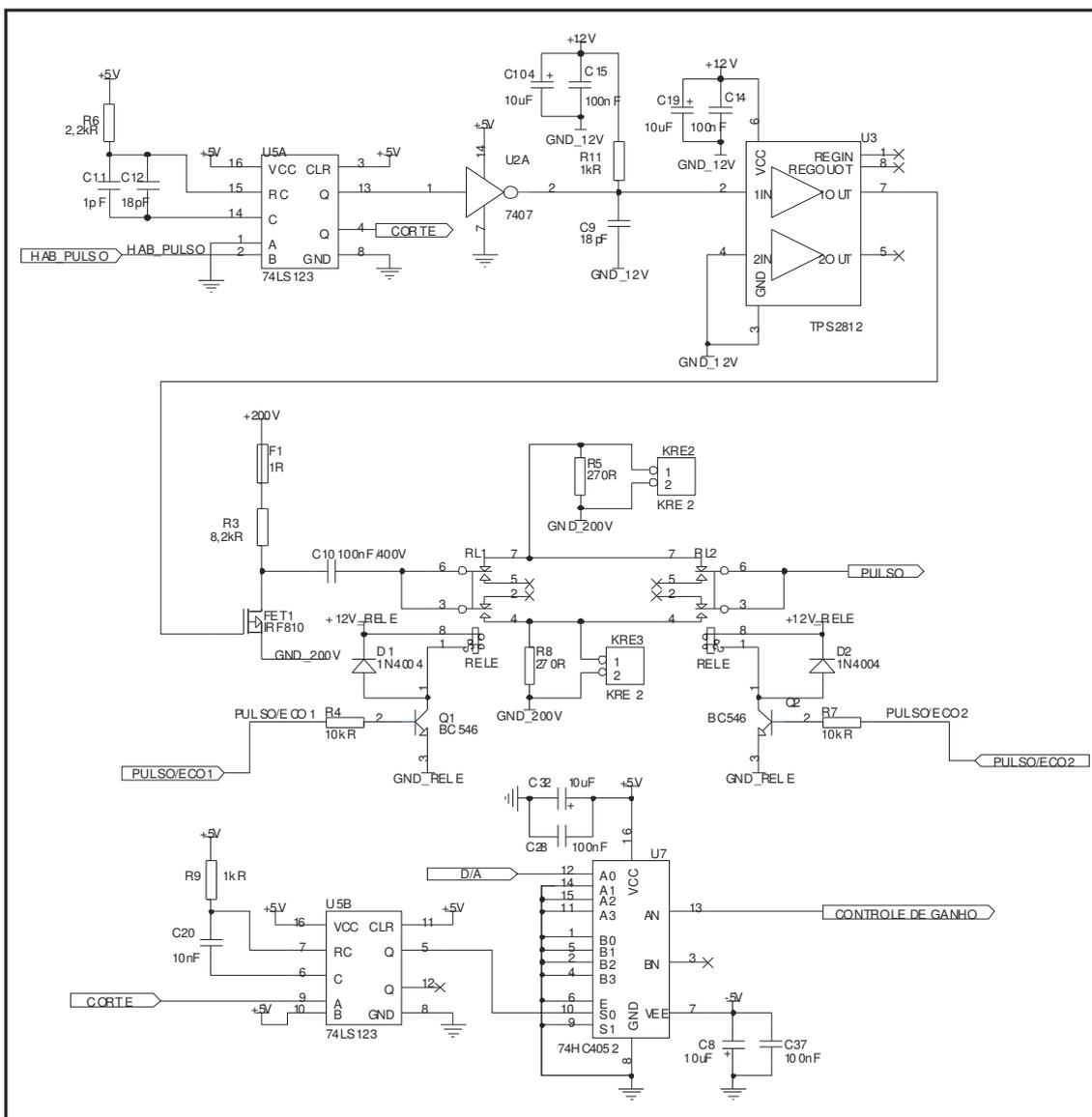


Figura 22 – Circuitos da unidade de transmissão do sistema.

### 3.2.1 Circuito de disparo

O circuito de disparo tem a função de gerar um pulso positivo com amplitude de +5 V e largura reduzida, sincronizado na borda de subida do sinal de comando. Para esta função foi utilizado um circuito multivibrador na configuração monoestável representado pelo circuito integrado 74LS123 (U5A). Esse componente possui dois módulos multivibradores monoestáveis no mesmo encapsulamento, permite a geração de pulsos de largura estreita até 40 ns e configuração de disparo na borda de subida ou descida, conforme os níveis presentes nos pinos A, B e CLR do mesmo.

O circuito multivibrador (Figura 23) está configurado para disparar na borda de subida do sinal HAB\_PULSO enviado pelo *latch* 1, gerando um pulso com largura aproximada de 70ns, obtida em função do resistor R6 de 2,2 k $\Omega$  e do paralelo dos capacitores C11 e C12, de 1 pF e 18 pF respectivamente, conforme especificado no gráfico apresentado da folha de dados do fabricante [TEXAS INSTRUMENTS \(2005a\)](#). A saída complementar do primeiro circuito é utilizada para disparar o segundo circuito multivibrador monoestável (U5B) que tem a função de enviar um pulso para o circuito de corte, com largura maior que o pulso de transmissão. Com isto, durante a geração do pulso de alta amplitude o estágio de recepção não deve amplificar o sinal que chega à sua entrada, evitando a saturação do circuito amplificador.

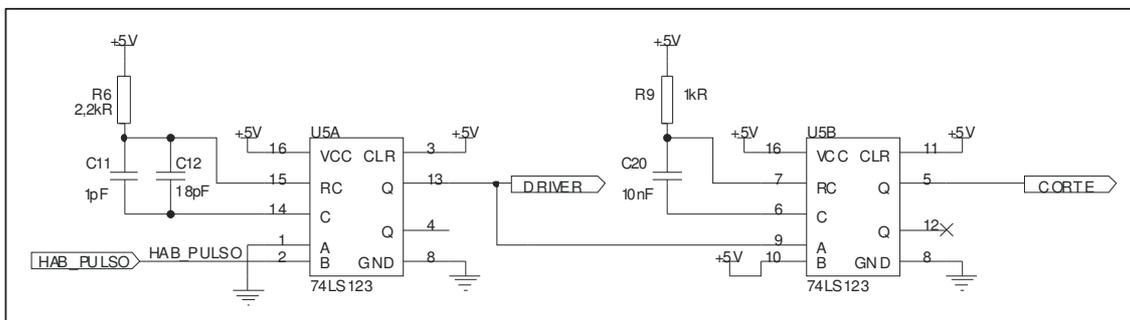


Figura 23 – Circuitos multivibradores monoestáveis utilizados na unidade de transmissão.

### 3.2.2 Conversor de nível lógico e *driver* de corrente

Para o conversor de nível lógico na entrada da unidade de transmissão, utilizou-se o circuito integrado SN7407 (U2) que é um *buffer* de tensão com entrada compatível com nível TTL e saída tipo coletor aberto, possibilitando a interface com dispositivos com tensões de alimentação até +30 V. O *buffer* tem a função de receber o sinal TTL do circuito multivibrador e convertê-lo para nível de tensão de +12 V, necessário para a compatibilidade de tensão com o circuito *driver* de corrente. Por ser um *buffer* TTL com coletor aberto, possui capacidade de fornecer até 30 mA de corrente ao próximo estágio, diminuindo o tempo de comutação do sinal de saída. Na saída em coletor aberto foram conectados o resistor R11 de 1 k $\Omega$ , como *pull-up* para a tensão de +12 V, fornecendo um nível lógico CMOS nessa saída, e o capacitor de polarização C9 de 18 pF (Figura 24).

Com a finalidade de simplificar o circuito de polarização e aumentar a capacidade de fornecimento de corrente para o acionamento do transistor de potência, foi utilizado o circuito

integrado TPS2812 (U3) como *driver* de corrente. O TPS2812 é um *driver* de corrente de alta velocidade, da Texas Instruments, específico para acionamento de transistores MOSFET canal N. Na unidade de transmissão o CI (circuito integrado) recebe o pulso de amplitude de +12 V do *buffer* de tensão e gera o sinal necessário para o acionamento do transistor MOSFET com largura de 70 ns.

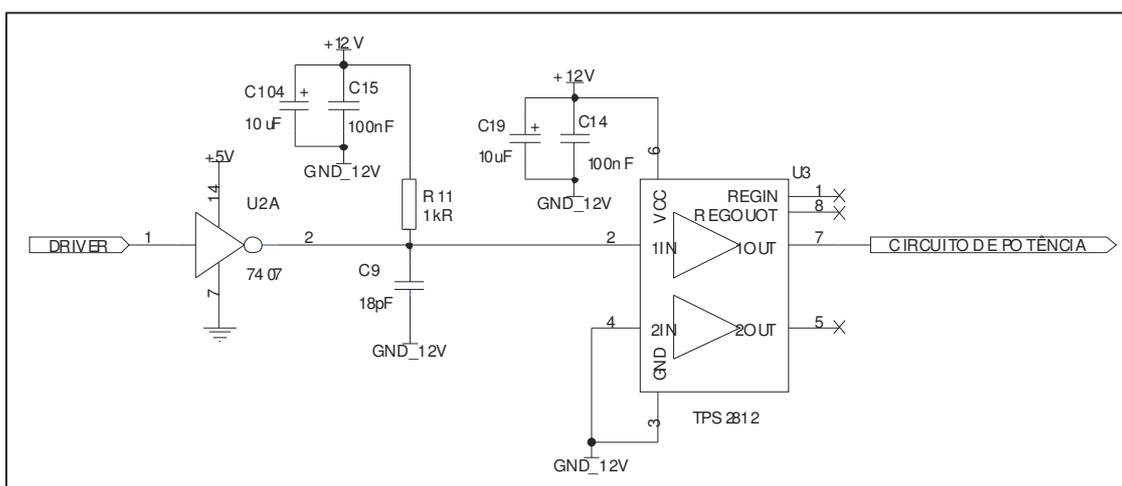


Figura 24 – Circuitos *buffer* de tensão e *driver* de corrente para o acionamento do circuito de potência.

### 3.2.3 Circuito de potência

O elemento principal do circuito de potência, apresentado na Figura 25, é o MOSFET IRF840 (FET1). O IRF840 é um MOSFET canal N que pode ser chaveado em altas frequências, para tensões até +500 V e com resistência de  $0,85 \Omega$  na região de saturação (*rds on*). Como a amplitude dos pulsos gerados tem no máximo +200 V, esse dispositivo atende às necessidades do *hardware*. Assim, o pulso que foi gerado pelo monoestável e que também passou pelo circuito de condicionamento do sinal, é utilizado para o chaveamento do IRF840, gerando o pulso elétrico de alta amplitude.

Quando o nível lógico 0 é aplicado no *gate*, o MOSFET opera na região de corte, permitindo que o capacitor C10 de 100 nF seja carregado, através do resistor R3 de  $8,2 \text{ k}\Omega$ , até se igualar à tensão de alimentação da fonte de +200 V. Quando esse nível lógico muda para 1, o transistor entra na região de saturação, praticamente aterrando o terminal positivo do capacitor C10. Com isso, toda a tensão do capacitor é descarregada na carga, porém com

polaridade invertida, fazendo com que um pulso de alta amplitude seja aplicado na saída. Esse pulso tem aproximadamente a mesma largura do pulso utilizado para chaveamento do transistor e amplitude igual à da fonte de alta tensão, com polaridade invertida, de -200 V.

Os transdutores são conectados ao circuito de potência via os conectores KRE2 (transdutor 1) e KRE3 (transdutor 2) de duas entradas cada. Em paralelo com os conectores foram conectados os resistores R5 e R8 de 270  $\Omega$  para realizar o casamento de impedância entre transdutor e o circuito de potência, para permitir a máxima transferência de energia.

Com a finalidade de tornar o sistema mais flexível, foi implementado um circuito de seleção de transdutor conforme o modo de operação, composto pelos relés RL1 e RL2. Os relés utilizados são do modelo JX2RC2 da empresa Metaltex, com bobinas alimentadas a partir de 12 Vdc e dois contatos reversíveis para tensão de 220 Vac com capacidade até 5 A. Os contatos dos relés foram conectados de forma a permitir a seleção dos transdutores para operar no modo transmissão-recepção nos dois sentidos ou pulso-eco em cada um dos dois transdutores, conforme a configuração do sistema. O acionamento dos relés é realizado através dos sinais PULSO/ECO1 e PULSO/ECO2 da lógica de controle, aplicados à base dos transistores Q1 e Q2. Com nível lógico 0 aplicado à base, os transistores ficam cortados e os contatos dos relés permanecem no seu estado padrão, e com nível lógico 1 os contatos mudam de posição permitindo uma nova configuração, conforme a Tabela 9. São utilizadas as abreviações T1 e T2 para indicar os transdutores 1 e 2.

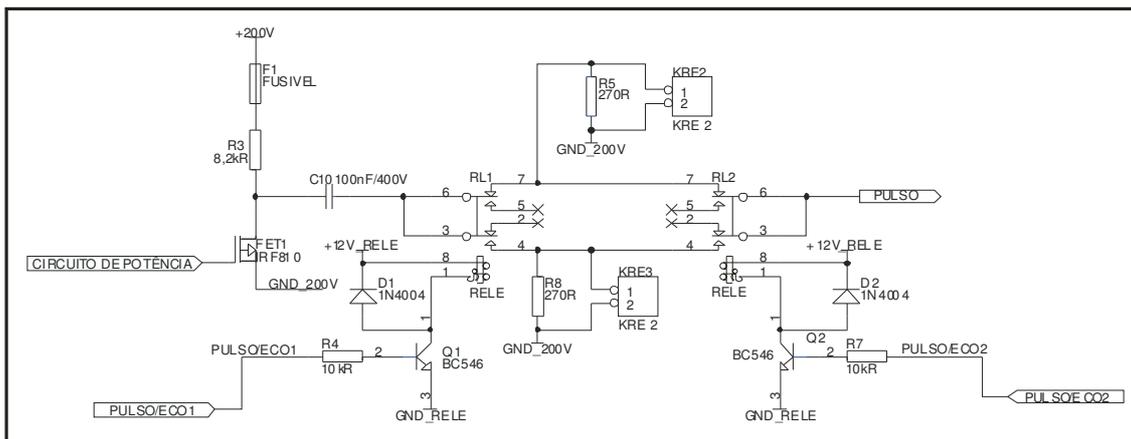


Figura 25 – Circuitos de potência para a geração do pulso elétrico de +200 V e para seleção do modo de operação dos transdutores.

Tabela 9 - Modos de operação do sistema em relação aos estados dos sinais PULSO/ECO1 e PULSO/ECO2.

Sinais de seleção do modo de operação		Modo de operação
PULSO/ECO1	PULSO/ECO2	
0	0	T1 (KRE2) operando no modo Pulso-eco
0	1	T1 transmitindo e T2 recebendo
1	0	T2 transmitindo e T1 recebendo
1	1	T2 (KRE3) operando no modo Pulso-eco

### 3.2.4 Circuito de corte

No modo pulso-eco, a saída do circuito de transmissão está conectada diretamente à entrada do circuito de recepção e com isso, durante a geração dos pulsos de excitação do transdutor, existe a necessidade que o estágio de recepção atenuar ao máximo o sinal na sua entrada, evitando que o amplificador do estágio seja saturado. Essa função é realizada pelo circuito de corte composto pelo segundo circuito multivibrador monoestável do CI 74LS123 e pelo multiplexador 74HC4052.

O segundo circuito multivibrador monoestável (U5B), opera sincronizado na borda de descida do sinal complementar ao pulso gerado pelo circuito de disparo (U5A), gerando um pulso positivo de +5 V, com largura aproximada de 4  $\mu$ s, obtida em função do resistor R5 de 1 k $\Omega$  e do capacitor C20 de 10 nF. Esse pulso de corte é muito maior que o pulso de excitação do transdutor (70 ns) e irá impedir que o estágio de amplificação da recepção amplifique qualquer sinal aplicado à sua entrada.

Para realizar a seleção de um entre os dois sinais analógicos que podem ser aplicados ao amplificador do circuito de recepção, para controle do ganho, foi utilizado o multiplexador 74HC4052 (U7). Esse componente possui dois circuitos multiplexadores internos de quatro canais analógicos com uma saída cada, controlados digitalmente, porém foi necessário apenas um multiplexador para o sistema. A saída do circuito monoestável está conectada no pino de seleção de canal S0 do multiplexador. O outro pino de seleção é ligado ao sinal de terra do circuito. Com isso, são utilizados apenas dois dos quatro canais disponíveis no multiplexador. O sinal de 0 V, que representa a tensão de corte, está conectado nos canais A1, A2 e A3, e o

nível de tensão da saída do conversor D/A equivalente ao ganho do circuito de recepção, configurado pelo usuário, é conectado no canal A0 (Figura 26). Quando não há pulso vindo do monoestável, o canal A0 está selecionado e o sinal da saída do conversor D/A aparecerá na saída do multiplexador. Caso contrário, o canal 1 é transferido para saída. O sinal de saída é aplicado ao pino de controle de ganho do amplificador de recepção. Assim sendo, durante a geração do pulso de alta amplitude, um nível de tensão de 0 V é aplicado ao pino de ganho, fazendo com que o amplificador atenuie em 40 dB o sinal de recepção. Nos outros instantes o ganho é dado pelo nível de tensão entre -2 V e 0 V que é aplicado pelo circuito conversor digital para analógico.

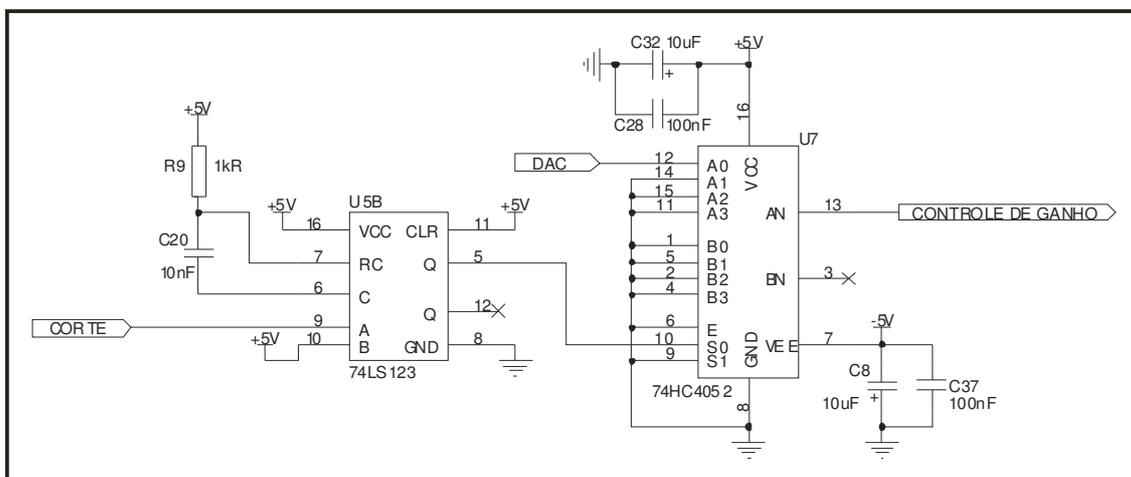


Figura 26 – Circuito de corte.

### 3.3 UNIDADE DE RECEPÇÃO

A unidade de recepção, mostrada no diagrama em blocos da Figura 27, é responsável por receber e amplificar, conforme a configuração do sistema, os sinais captados por um transdutor conectado à sua entrada. Essa unidade é formada pelos circuitos de proteção contra sobre-tensão, conversor D/A para controle de ganho do circuito amplificador de recepção, conversor A/D de alta velocidade e memória FIFO para armazenamento do *buffer* de dados digitalizados, apresentados na Figura 28.

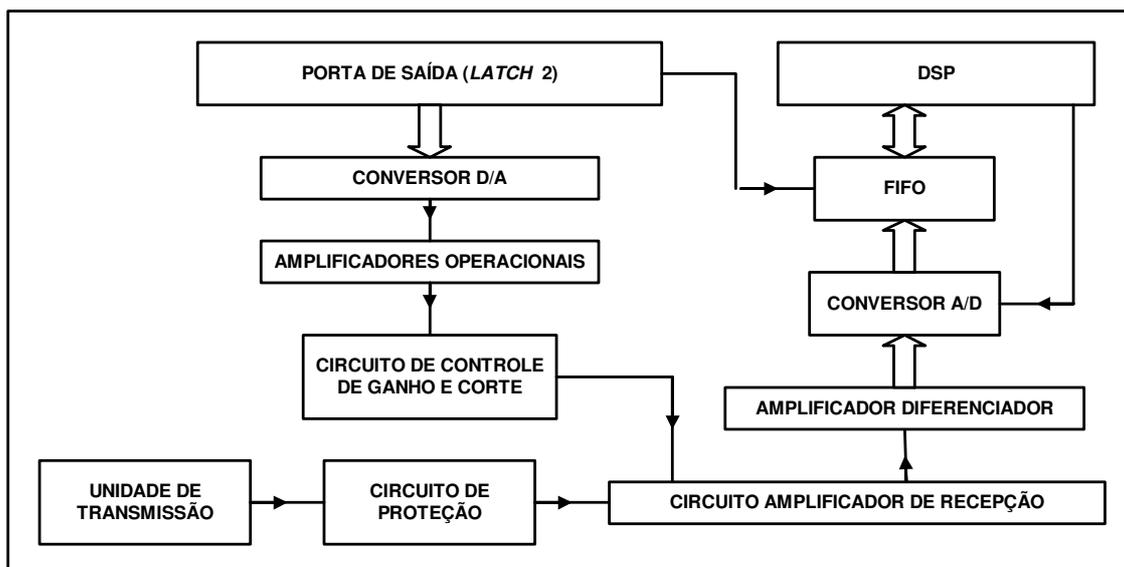


Figura 27 – Diagrama em blocos da unidade de recepção.

Na operação em pulso-eco, o transdutor que é excitado com os sinais elétricos de alta amplitude é o mesmo que capta sinais de ultra-som. Com isso, é necessário um circuito de proteção para evitar que as altas tensões danifiquem o circuito amplificador. Após o sinal recebido passar pelo circuito de proteção, é condicionado através do circuito amplificador com ganho controlado por tensão, que permite a amplificação do sinal em uma faixa entre -40 dB a +40 dB. A tensão analógica para controle do ganho do circuito amplificador varia entre - 2 V e 0 V, sendo obtida por um circuito conversor D/A. O sinal de saída do circuito amplificador de recepção é aplicado em um amplificador diferenciador necessário para a entrada simétrica do conversor A/D. A memória FIFO tem a função de armazenar o sinal digitalizado pelo A/D em alta velocidade para que o DSP possa realizar a leitura do bloco de dados em uma velocidade mais baixa.

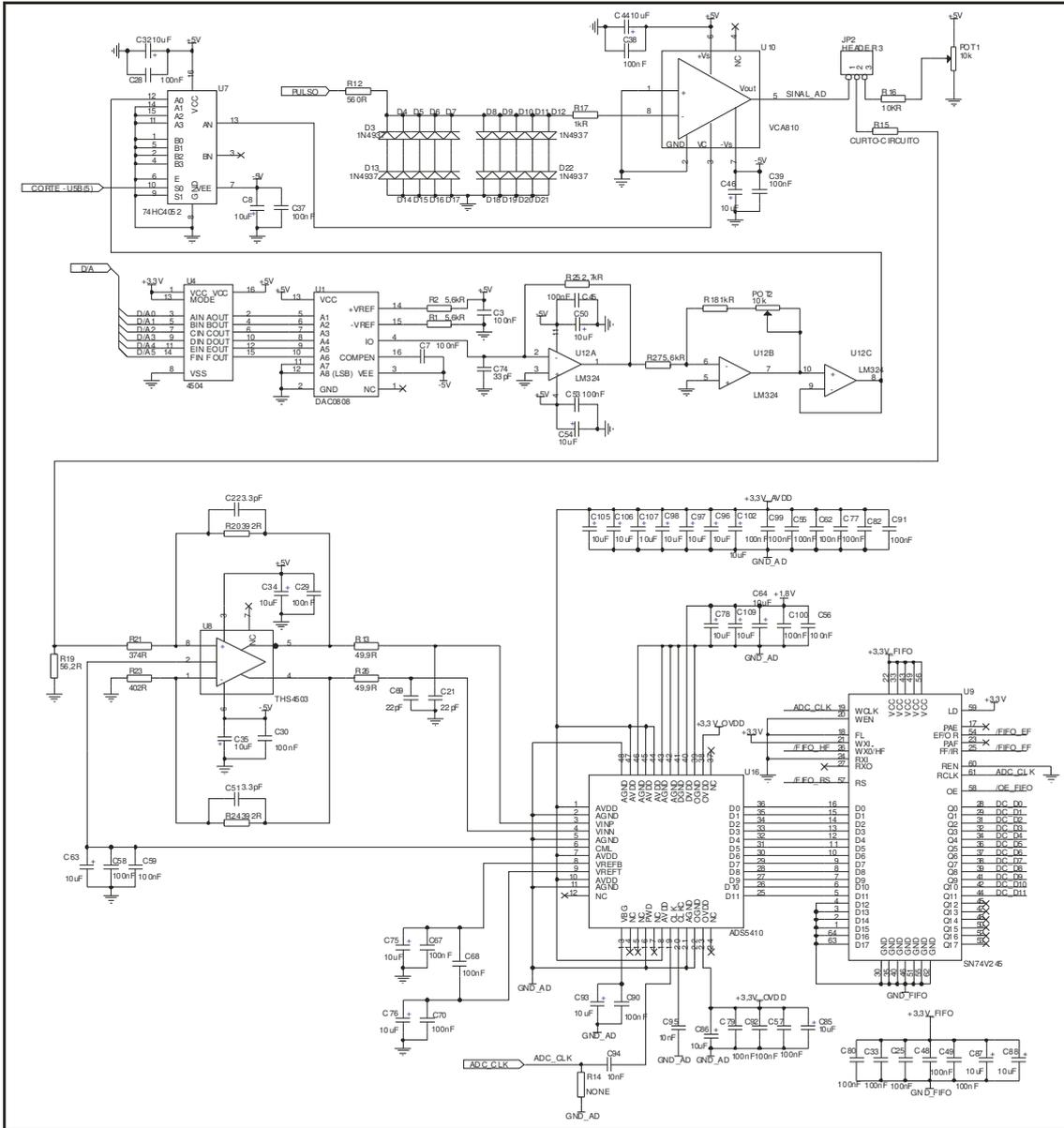


Figura 28 - Circuitos da unidade de recepção do sistema.

### 3.3.1 Circuito de proteção da unidade de recepção

O circuito de proteção, apresentado na Figura 29, é necessário para evitar danos no circuito de recepção por sobre-tensão, no modo de configuração pulso-eco, com o circuito de transmissão conectado à entrada do circuito de recepção. Com esse circuito, quando o pulso elétrico de alta amplitude é aplicado ao transdutor, e conseqüentemente, à entrada do circuito de recepção, os pares de diodos são polarizados diretamente, ceifando a amplitude do sinal

aplicado ao circuito amplificador em  $-1,4\text{ V}$  para o pulso de polaridade negativa ou em  $\pm 1,4\text{ V}$  pico a pico, com os diodos no sentido contrário polarizados diretamente, caso ocorra alguma oscilação do circuito de transmissão durante a aplicação do pulso. Para aumentar a velocidade de operação do circuito de proteção foram colocados 20 diodos 1N4937, separados em 5 pares montados em paralelo e o restante em anti-paralelo (D3 ao D22), dividindo-se a corrente de condução através dos pares e evitando que qualquer variação de amplitude acima de  $2,8\text{ V}$  seja aplicado ao circuito amplificador. Para os ecos recebidos, os diodos funcionam como circuito aberto, visto que as amplitudes dos mesmos não são suficientes para ultrapassar a faixa de tensão entre  $-1,4\text{ V}$  e  $+1,4\text{ V}$ , permitindo a transferência total dos sinais à entrada do circuito amplificador. Os diodos 1N4937 foram escolhidos para o sistema, pois são diodos rápidos com tempo de recuperação reversa de  $150\text{ ns}$ , suportam tensão reversa de  $600\text{ V}$  e corrente de condução de até  $1\text{ A}$ . O resistor R12, de  $560\ \Omega$ , é utilizado para limitar a corrente de condução quando os diodos estão polarizados diretamente e evitar que o pulso de alta amplitude para a excitação do transdutor seja aterrado, danificando os diodos. Na recepção dos ecos, o resistor R12 não apresenta influência, visto que a impedância do circuito amplificador é de aproximadamente  $1\text{ M}\Omega$ , proporcionando insignificante queda de tensão sobre o resistor.

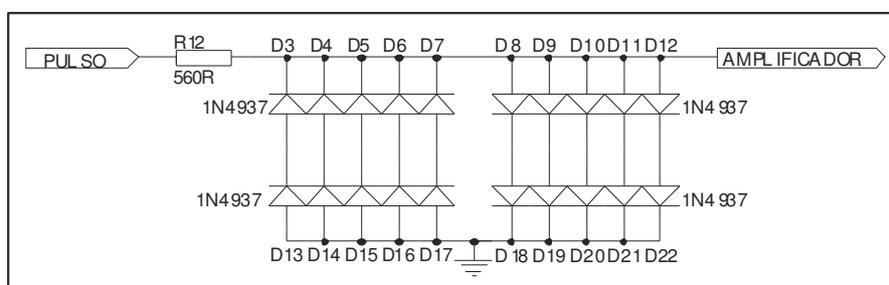


Figura 29 – Circuito de proteção.

### 3.3.2 Circuito conversor D/A

Para possibilitar que o DSP realize o controle de ganho do circuito amplificador na recepção, foi desenvolvido um circuito conversor digital para analógico. O circuito do conversor D/A é composto por um CI DAC0808, um conversor de nível de tensão, e um

circuito amplificador com buffer para condicionamento do sinal e casamento de impedância, conforme é apresentado na Figura 30.

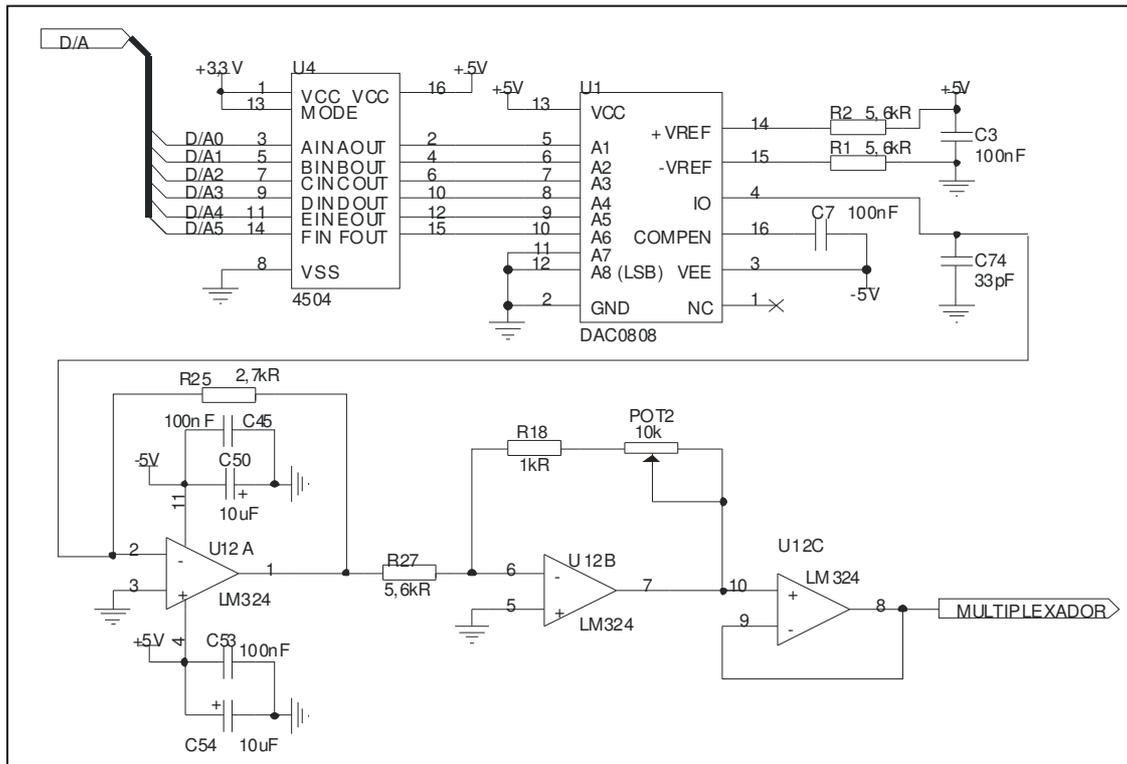


Figura 30 – Circuito conversor D/A para ajuste do ganho do amplificador de recepção.

O DAC0808 (U1) é um conversor D/A com resolução de 8 bits e tensão de alimentação de +5 V, que em conjunto com o amplificador operacional LM324 (U12), tem a função de converter os níveis lógicos TTL presentes nas suas entradas em nível analógico, entre a faixa de tensão de -2 V a 0 V, para permitir o controle de ganho do sinal de entrada do circuito amplificador de recepção entre os valores de -40 dB e +40 dB. O valor da tensão analógica para o controle de ganho da unidade de recepção em função das entradas digitais do conversor D/A, obtido pela especificação do manual do fabricante [NATIONAL \(2005a\)](#), é descrito através da Equação 43:

$$V_o = -\left(\frac{R_{25}}{R_2}\right) * \left(\frac{R_{18} + R_{pot}}{R_{27}}\right) * \left(\frac{A_1}{2} + \frac{A_2}{4} + \frac{A_3}{8} + \frac{A_4}{16} + \frac{A_5}{32} + \frac{A_6}{64} + \frac{A_7}{128} + \frac{A_8}{256}\right) \quad (43)$$

Onde:

- $V_o$  é a tensão de saída do circuito conversor D/A para o controle de ganho da unidade de recepção;

- $R_{pot}$  é o valor ajustado no *trimpot* POT2 de 10 k $\Omega$ ;
- $R_2$  e  $R_{27}$  são iguais a 5,6 k $\Omega$ ;
- $R_{18}$  é igual a 1 k $\Omega$ ;
- $R_{25}$  é igual a 2,7 k $\Omega$ ;
- $A_1$  a  $A_8$  são os níveis lógicos TTL (0 ou 1) que podem ser aplicados às 8 entradas do DAC0808.

O *trimpot* POT2 é utilizado para realizar o ajuste fino da tensão de saída do circuito DAC, controlado pelos amplificadores operacionais U12A e U12B, compensando o erro provocado pela tensão de *offset* presente nas saídas dos amplificadores. Com base na Equação 43, com o *trimpot* ajustado para o valor máximo de 10 k $\Omega$  a tensão de saída é de -4,66 V e para o valor mínimo de 0  $\Omega$  a tensão de saída equivale a -0,424 V. O valor do *trimpot* foi ajustado colocando as seis entradas mais significativas do DAC em nível lógico 1 e medindo a tensão na saída do amplificador operacional U12C, até o valor de -2 V, resultando no valor próximo de 3,72 k $\Omega$ . Foram utilizadas apenas as seis entradas mais significativas das oito entradas do circuito DAC, para facilitar a montagem do circuito, pois foi necessário utilizar o CI 4504 (U4) para converter os pulsos de tensão de +3,3 V da saída do *latch* 2, da lógica de apoio, para +5 V necessário para o funcionamento correto do conversor D/A, e esse CI possui apenas seis entradas para conversão de nível. Com isso, os termos que contém  $A_7$  e  $A_8$  na Equação 43 são iguais a zero. A Tabela 10 mostra os valores de ganho que podem ser configurados para circuito de recepção, o valor equivalente em hexadecimal que o DSP envia para conversão e a tensão analógica que é gerada pelo circuito D/A. Após a conversão o sinal é aplicado no canal A0 do CI 74HC4052 (U7), que realiza a multiplexação desse sinal com o sinal proveniente do circuito de corte.

Tabela 10 – Ganhos de tensão da unidade de recepção que podem ser configurados para o sistema, valores equivalentes em hexadecimal e tensão de saída do conversor D/A.

Ganho de tensão (dB)	Equivalente hexadecimal	Tensão de saída do D/A (V)
-40	00 h	0,00
-30	08 h	-0,25
-20	10 h	-0,50
-10	18 h	-0,75
0	1F h	-1,00
+10	27 h	-1,25
+15	2C h	-1,38
+20	2F h	-1,50
+25	34 h	-1,63
+30	37 h	-1,75
+40	3F h	-2,00

### 3.3.3 Circuito de amplificação com ganho variável

A amplificação dos sinais recebidos pela unidade de recepção é realizada pelo CI VCA610 (U10), da Texas Instruments. O componente é um amplificador com ganho controlado por tensão, que possui elevada taxa de ajuste de ganho, entre -40 e +40 dB, largura de banda até 30 MHz, taxa de inclinação de 300 V/ $\mu$ s e impedância de entrada de 1 M $\Omega$ . O ganho é controlado pelo nível de tensão aplicado no pino 3 do VCA610 (Figura 31), variando entre -2 V, equivalente a um ganho de tensão de +40 dB, e 0 V, para ganho de -40 dB. O VCA610 é ligado na configuração inversora, recebendo o sinal de entrada do circuito de proteção, limitado a uma amplitude em 2,8 V pico a pico, ou amplitude de -1,4 V. O controle do ganho de tensão está conectado na saída do CI multiplexador 74HC4052. Esse multiplexador, descrito no circuito de corte (seção 3.2.4), faz com que, no instante em que é gerado o pulso de alta amplitude para excitação do transdutor no circuito de transmissão, seja enviado um sinal, durante 4 $\mu$ s aproximadamente, com nível de tensão igual a zero para o pino de controle de ganho do amplificador, atenuando o sinal na entrada do amplificador em 40 dB. Essa ação é necessária para evitar que o VCA610 fique saturado com a presença de sinais de alta amplitude, principalmente gerados no modo pulso-eco, no qual o transdutor

transmissor é o mesmo que o receptor. Nos outros instantes o sinal aplicado ao pino de controle de ganho recebe do multiplexador o sinal gerado pelo circuito de controle de ganho. O resistor R17 de 1 k $\Omega$  é utilizado como proteção redundante da entrada do circuito amplificador e a saída do VCA610 é aplicada no circuito de condicionamento de sinal do conversor analógico para digital.

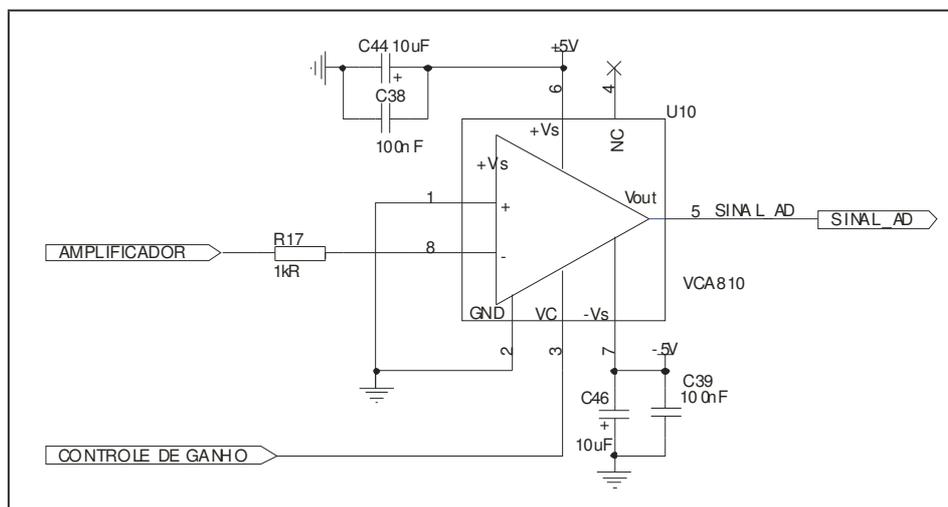


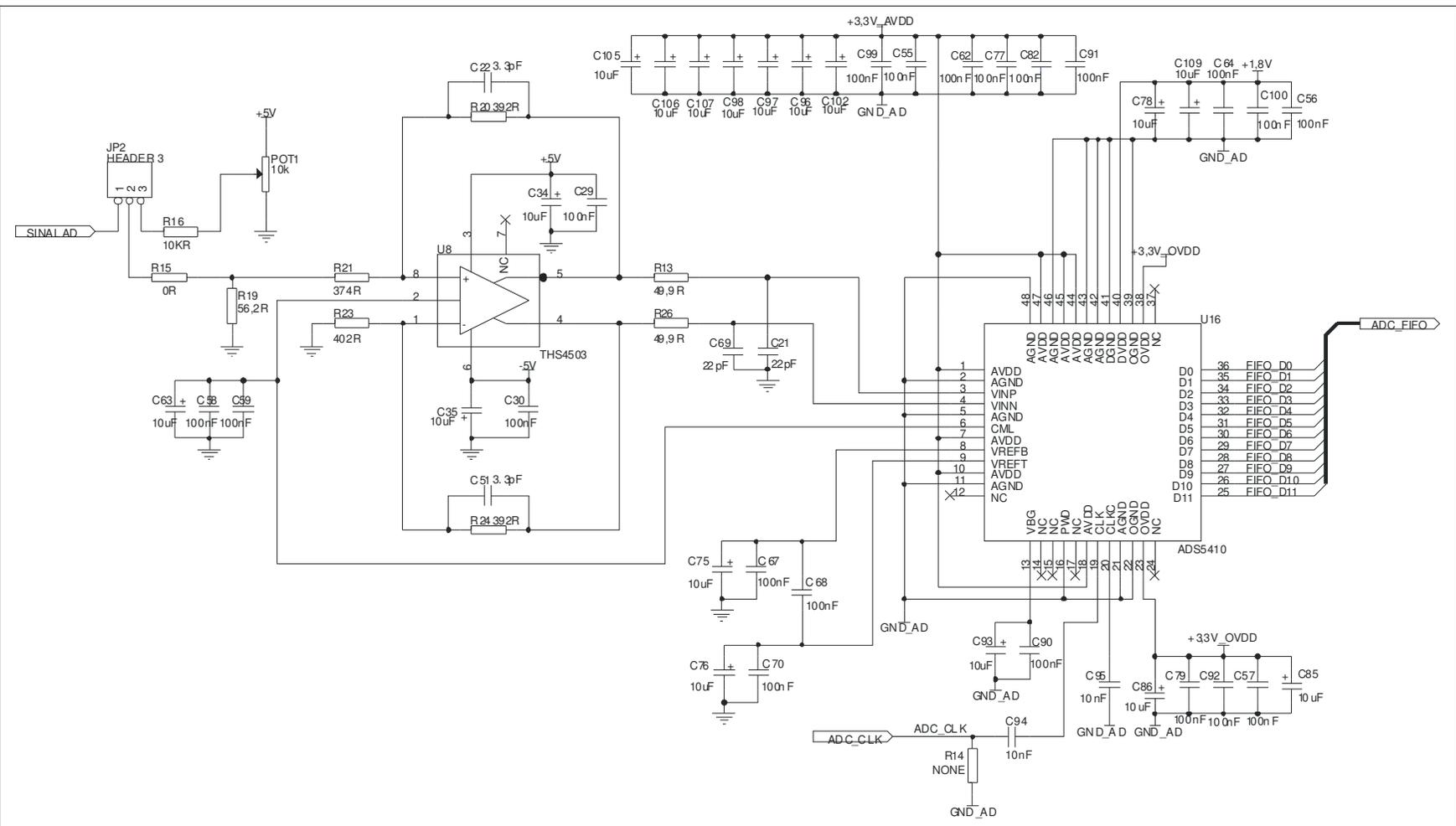
Figura 31 – Circuito amplificador da unidade de recepção

### 3.3.4 Circuito conversor A/D

O sinal ultra-sônico recebido pelo circuito amplificador, na unidade de recepção, passa por um circuito conversor A/D, para permitir o armazenamento do sinal digitalizado na memória FIFO e posterior leitura e no DSP. Esse circuito é formado por um amplificador conversor de entrada simples para diferencial e um conversor A/D de alta velocidade. O conversor A/D utilizado no sistema é o ADS5410 (U16), da Texas Instruments, que apresenta taxa de amostragem de 80 milhões de amostras por segundo, arquitetura interna tipo *pipeline* de alto desempenho, largura de banda de 1GHz, resolução de 12 *bits*, geração da referência para conversão de tensão de +1,8 V, entrada em modo diferencial e saída em complemento de dois. O controle interno analógico do ADS5410 é alimentado com tensão de +3,3 V e a parte de controle interno digital opera com alimentação de +1,8 V, obtida pelo regulador de tensão TPS76718 (U17) a partir da tensão de +3,3 V. As saídas digitais do ADS5410 possuem alimentação separada permitindo tensões entre +1,6 V e +3,6 V, sendo que para o sistema o valor utilizado foi de +3,3 V. As entradas do conversor são diferenciais, centradas na tensão

de modo comum (VCM) de +1,8 V gerada pelo próprio dispositivo. A tensão de fundo de escala para o modo diferencial é obtida com as duas entradas, positiva VINP (pino 3) e negativa VINN (pino 4), simétricas em  $V_{CM} + 0,5 \text{ V}$  e  $V_{CM} - 0,5 \text{ V}$ , respectivamente. A frequência de *clock* para o funcionamento do conversor varia entre 5 MHz e 80 MHz, sendo configurada pelo sistema e gerada pelo DSP. Para evitar ao máximo os ruídos, como o do chaveamento do *clock*, foram colocados vários capacitores multicamadas de 100 nF e de tântalo de 10  $\mu\text{F}$  em paralelo, próximos aos pinos de alimentação do conversor A/D. Como o modo de entrada do conversor é diferencial foi utilizado o amplificador THS4503 (U8), com ganho unitário, para converter a saída do circuito amplificador VCA610 de saída simples para saída diferencial (Figura 32). O THS4503 é um amplificador diferencial específico para operar com conversores analógico para digital de alta velocidade, apresentando largura de banda de 370 MHz, taxa de inclinação de 2800 V/us, tensão de alimentação balanceada entre +5 V e -5 V e entrada para tensão de referência de modo comum. O circuito de conexão entre o amplificador diferencial e o conversor A/D foi implementado com base no manual da placa de conversão ADS5410 EVM, desenvolvida pela [TEXAS INSTRUMENTS \(2005b\)](#).

Figura 32 – Circuito do conversor A/D ADSS5410 da unidade de recepção.



### 3.3.5 Memória FIFO

No circuito de recepção, o sinal de ultra-som é condicionado e enviado para o circuito conversor analógico para digital com faixa de amostragem entre 5 MHz e 80 MHz. O próximo passo seria conectar o ADC diretamente ao barramento do DSP para permitir a aquisição dos dados em alta velocidade. Porém, para a frequência de 80 MHz o DSP, que opera no sistema com barramento interno de 160 MHz, teria que realizar uma operação de leitura do circuito ADC a cada dois ciclos internos, o que não é possível devido à latência que limita a largura de banda das operações de E/S. Para solucionar este problema foi introduzida a memória FIFO de alta velocidade SN74V245 com a função de armazenar um grande bloco de dados digitalizados e permitir que o DSP realize a leitura de dados em uma velocidade mais baixa. A FIFO SN74V245 (U9), apresentada na Figura 33, é uma memória síncrona com 4096 endereços de 18 *bits*, que suporta frequências de *clock* até 133 MHz, com tempo de acesso para leitura de 5 ns. Todas as transferências de dados, através das portas de entrada e saída, são realizadas na transição do nível baixo para alto dos respectivos pinos de *clock*, sendo que estes são independentes entre si e podem ser assíncronos ou coincidentes, sendo o último utilizado para o sistema. Um pino de habilitação de saída OE (*output enable*) está conectado ao sinal OE\_FIFO da saída do decodificador de endereços 74LVC138 (U14) e controla quando a saída de dados está ativa ou em terceiro estado. Essa memória síncrona possui dois *flags* fixos para sinalização de operação, EF/OR (*Empty Flag/Output Ready*) e FF/IR (*Full Flag/Input Ready*), e dois *flags* programáveis, PAE (*Almost-Empty*) e PAF (*Almost-Full*). A carga do valor de *offset* dos *flags* programáveis é configurada em um estado de máquina inicializado via o pino LD (*load*). No sistema os *flags* fixos são utilizados para verificação do funcionamento da memória FIFO e os programáveis não são utilizados, sendo que o pino LD é conectado à tensão de +3,3 V. O *flag half-full* (HF) é disponível quando a FIFO é configurada como dispositivo único e está conectado no *buffer* 1 (U13), juntamente com os pinos EF e FF. Além disso, a memória apresenta dois modos de operação: o modo *first-word fall-through* (FWFT) e o modo *standard*. No modo FWFT, utilizado para os testes do sistema, a primeira palavra digital escrita na FIFO vazia é transferida para as linhas de dados de saída, após três transições do sinal ADC\_CLK. No modo *standard*, a FIFO apresenta funcionamento padrão, sendo que a primeira palavra escrita somente aparecerá na saída após o preenchimento completo da memória.

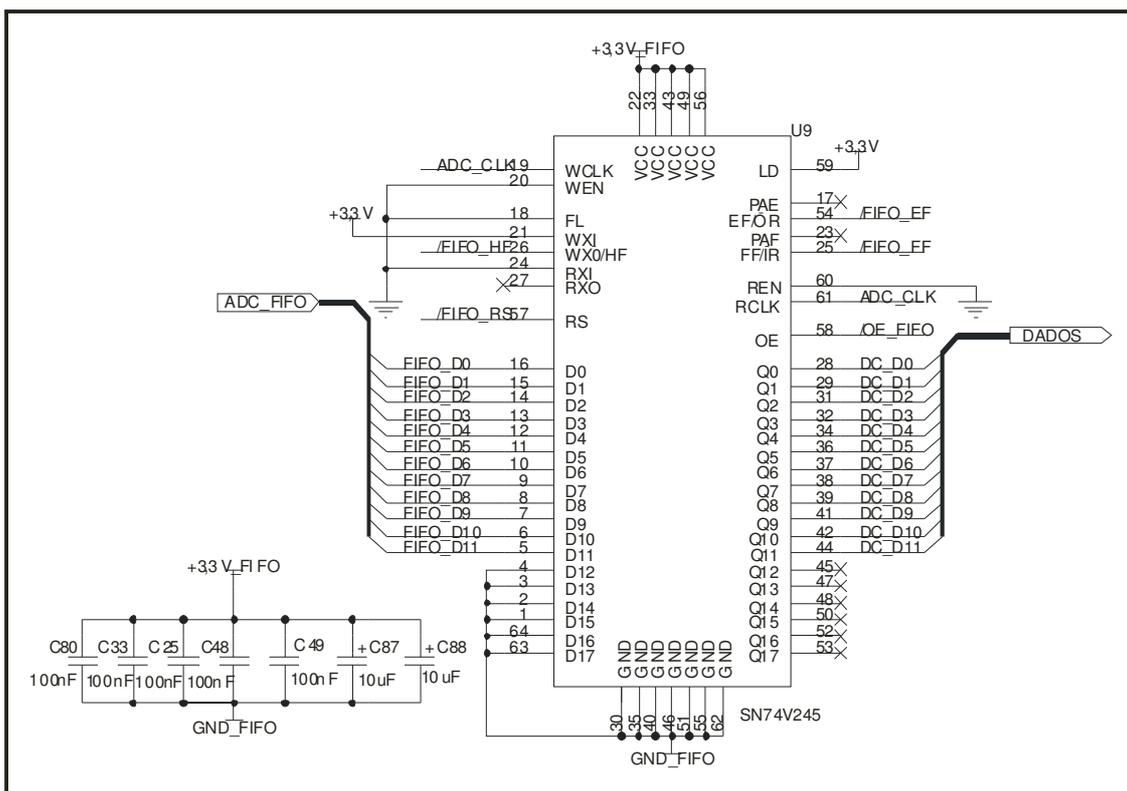


Figura 33 – Circuito da memória FIFO 74V245.

### 3.4 PLACA DRIVER\_V1

Para permitir que o sistema possa controlar motores de passo para o posicionamento preciso dos transdutores nos eixos x, y e z, necessários para o teste de varredura para mapeamento de área alvo, foi desenvolvida a placa Driver\_V1. A placa (Figura 34) é uma interface isolada que, conectada em um dos três conectores, JP1, JP3 ou JP4, da placa filha Interface\_V1, permite o acionamento de um motor de passo de quatro bobinas e leitura de dois sensores de fim de curso.

A placa Driver\_V1 possui seis optoacopladores 4N25, sendo quatro para o acionamento das bobinas do motor e dois para leitura de sensores de fim de curso, permitindo total isolamento de tensão entre a placa Interface\_V1 e o motor de passo, que é alimentado por uma fonte de tensão externa de +12 V.

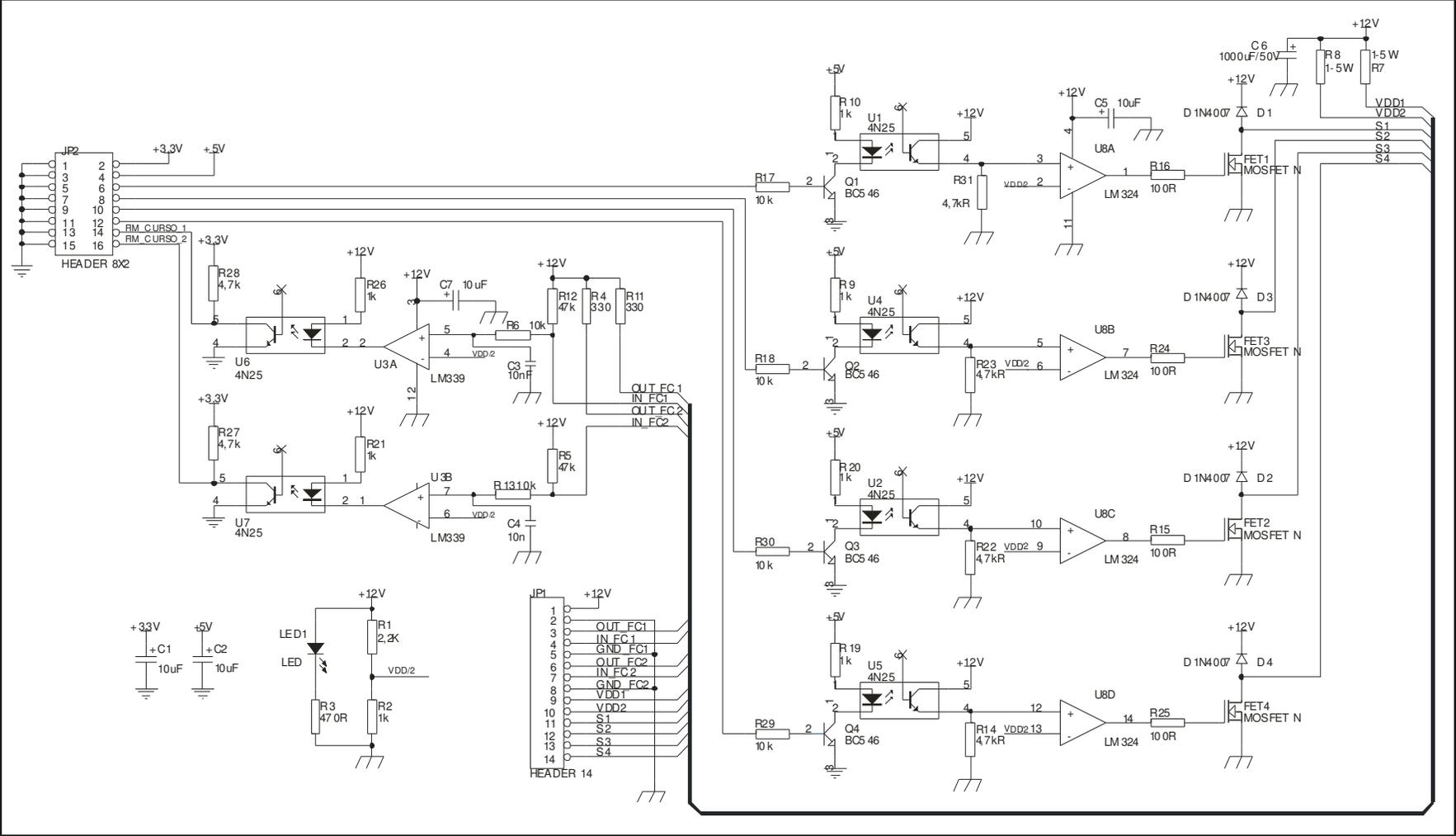


Figura 34 - Circuitos da placa DRIVER\_V1 para acionamento do motor de passo.

O acionamento de cada fase do motor é realizado através de um pulso positivo, com largura de 10ms, aplicado à base de um transistor BC546 correspondente, fazendo com que o transistor sature, conduzindo o optoacoplador 4N25 conectado no seu coletor. Nesse instante, um pulso com a mesma largura, porém com tensão isolada de +12 V é aplicado na entrada não-inversora do amplificador operacional LM324, que opera na configuração de comparador de tensão, enviando o pulso necessário para condução do MOSFET canal N conectado na sua saída. O comparador é utilizado para evitar que o MOSFET seja disparado por um ruído de tensão. Na ausência do pulso, a tensão do divisor resistivo na entrada inversora é maior que a tensão na entrada não-inversora, resultando em uma tensão de saída do circuito comparador de 0 V, necessária para que o transistor de potência permaneça parado.

### 3.5 FONTES DE ALIMENTAÇÃO

Para evitar a sobrecarga de corrente na fonte do *kit* da placa DSK foi desenvolvida a placa Fonte\_V1. O diagrama esquemático da placa Fonte\_V1, que mostra os circuitos das fontes para alimentar os componentes da placa Interface\_V1 e das placas Driver\_V1 com as tensões de -5 V, +5 V, -12 V e +12 V, é apresentado no Apêndice B.

A placa Fonte\_V1 foi montada com chave liga/desliga, chave H-H para seleção da tensão de entrada da rede de 120 V ou 220 V, retificador de onda completa em ponte no secundário do transformador de 12 V + 12 V com *tap* central, reguladores lineares da linha LM78XX e LM79XX, dois LEDs para sinalização visual das tensões de +5 V e +12 V e conectores de entrada AC e saídas DC tipo KRE.

A fonte de alimentação de +200 V, para a alimentação dos circuitos de potência da unidade de transmissão, é mostrada no Apêndice C. Para a fonte foi produzido um transformador isolador para as tensões de entrada da rede de 120 V ou 220 V no enrolamento primário, e dois enrolamentos isolados no secundário, sendo um de 200 V e o outro de 12 V + 12 V. Essa fonte foi montada com o regulador de tensão LM723 (U1), da National Semiconductor, utilizado para acionar a base do transistor de potência TIP 50 (T1), realizando uma regulação linear da tensão de saída (configuração retirada do manual do fabricante).

A tensão aproximada de saída é dada pela Equação 44 (NATIONAL SEMICONDUCTOR, 2005b):

$$V_{SAÍDA} = \left[ \frac{V_{REF}}{2} * \frac{R2 - (R1 + POT1)}{R1} \right]; R3 = R4 \quad (44)$$

Onde:

- $V_{saída}$  é a tensão de saída da fonte de alta tensão;
- $V_{ref}$  é a tensão de referência de 7,5 V (dado fornecido pelo fabricante);
- $R2$  é igual a 15 k $\Omega$ ;
- $R1$  é igual a 1 k $\Omega$ ;
- $POT1$  é igual a 22 k $\Omega$ ;
- $R27$  é igual a 5,6 k $\Omega$ ;
- $R3$  e  $R4$  são iguais a 3,3 k $\Omega$ .

Na placa filha Interface\_V1, são utilizados dois circuitos integrados reguladores lineares de tensão *low-dropout* para obtenção das tensões de +3,3 V e +1,8 V (Figura 35). O TPS76733D (U15) é o regulador responsável pela geração da tensão de alimentação de todos os dispositivos que operam com a tensão +3,3 V, obtida a partir da tensão de +5 V da fonte de alimentação externa. Com a finalidade de evitar *loops* de corrente e para testes iniciais, a tensão de +3,3 V da saída do TPS76733D é conectada aos demais blocos em um único ponto, através dos *straps* ST4, ST5 e ST7 (Figura 35). O TPS76718D (U17) é utilizado para regular a tensão da saída do TPS76733, de +3,3 V para +1,8 V, necessário para alimentação dos circuitos digitais internos do conversor analógico para digital ADS5410.

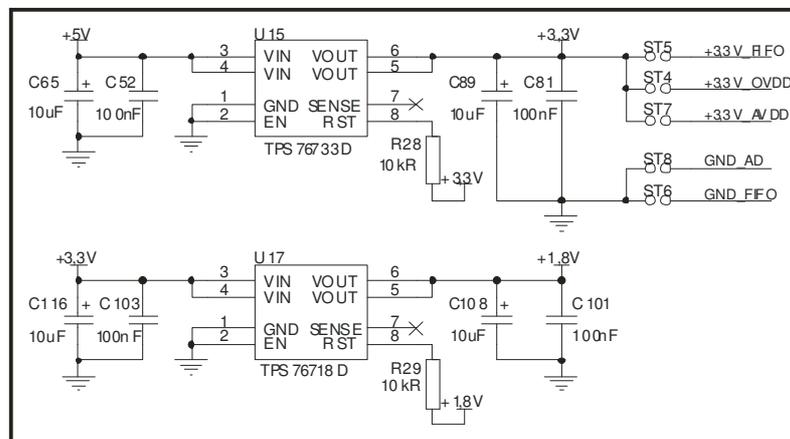


Figura 35 – Circuitos reguladores de tensão de +3,3 V e +1,8 V da placa Interface\_V1.

### 3.6 PROTÓTIPO DO *HARDWARE* DO SISTEMA

O protótipo do *hardware* do sistema de aquisição e processamento de sinais de ultrassom, formado basicamente por três placas de circuito impresso sobrepostas, é apresentado nas fotos das Figuras 36 e 37. A primeira placa (inferior) é a DSK TMS320VC5416 da Texas Instruments. A segunda e terceira placas, desenvolvidas em dupla face para atender à alta densidade de componentes e conexões necessárias, são a Interface\_V1 e a Driver\_V1, respectivamente.

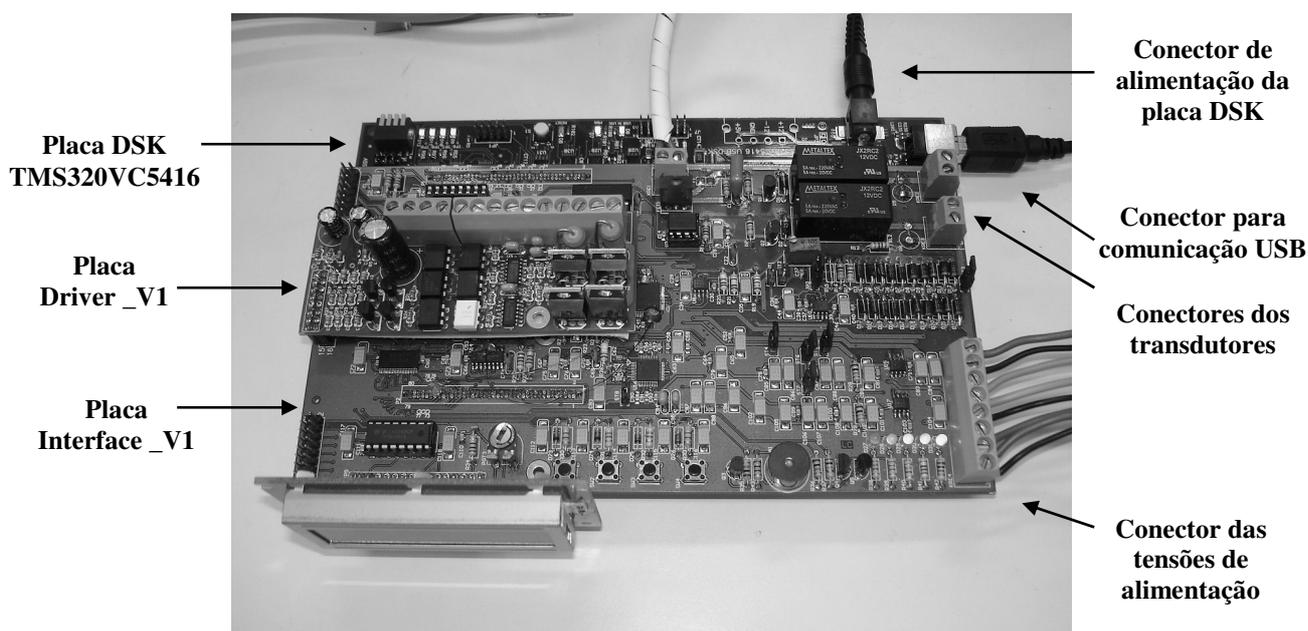


Figura 36 - Foto do *hardware* do sistema de aquisição e processamento.

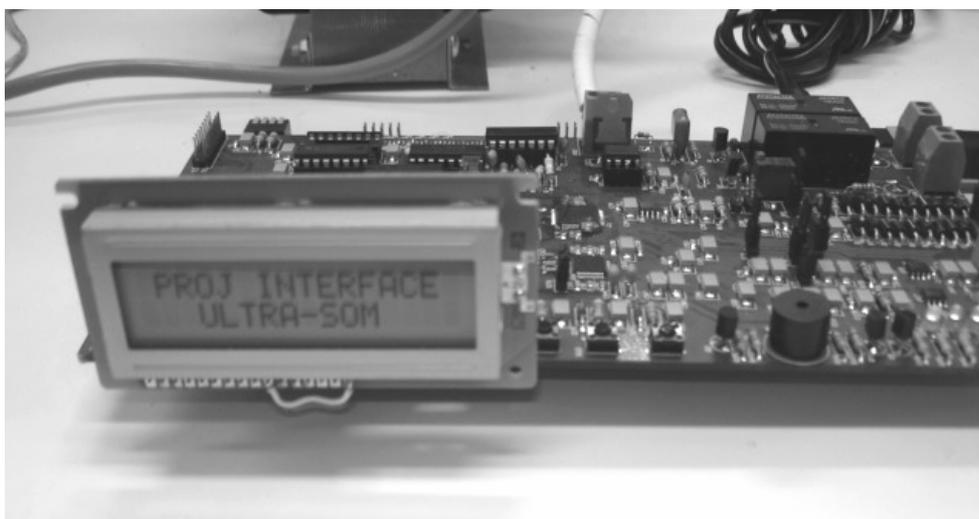


Figura 37 - Foto do LCD conectado na parte frontal do sistema de aquisição.

### 3.7 FIRMWARE DE CONTROLE DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO

O *firmware* de controle foi desenvolvido na linguagem C utilizando a ferramenta de desenvolvimento Code Composer Studio Versão 2, da Texas Instruments, para o DSP TMS320VC5416. Ele é responsável pelo controle do sistema, gerenciando e executando todas as tarefas necessárias para o funcionamento dos circuitos periféricos, tais como apresentação de mensagens com parâmetros e configurações no *display* de cristal líquido, sinalização dos LEDs e *buzzer*, leitura das chaves, controle das unidades de transmissão e de recepção, geração da frequência de amostragem para o conversor analógico para digital, controle de leitura da memória FIFO, acionamento dos motores de passo e comunicação com um microcomputador, para leitura das configurações e do *buffer* de dados digitalizados, via interface USB.

Para o *firmware* foi desenvolvida uma máquina de estados principal, representada pelo registrador estado\_lcd\_1 (Figura 38), e uma máquina de estados específica para cada parâmetro que pode ser configurado pelo sistema.

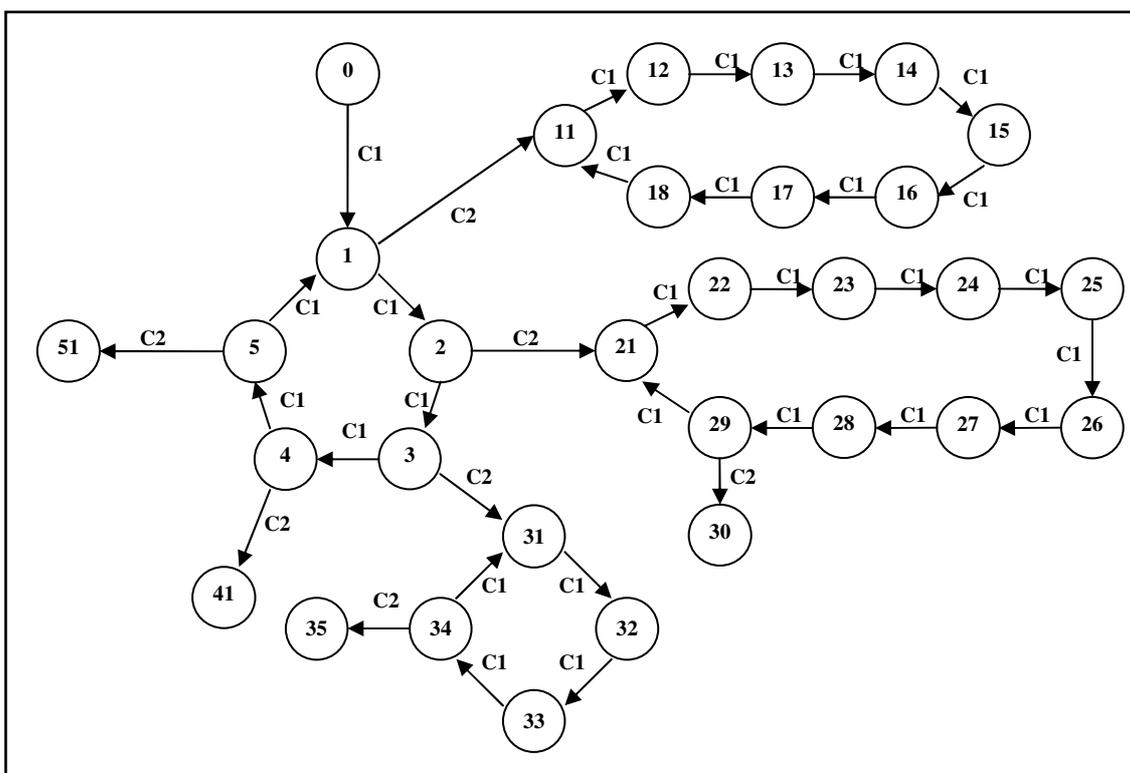


Figura 38 – Diagrama da máquina de estados principal do sistema, representada pelo registro estado\_lcd\_1.

As máquinas de estados mudam somente quando o *firmware* reconhece que uma chave válida foi pressionada. Quando as chaves 1 (C1) e 2 (C2) são soltas por mais de 2 segundos, a máquina de estados principal é reiniciada com 0.

A primeira parte do *firmware* é destinada às inicializações do sistema, tais como a chamada da rotina de configuração da placa DSK, configuração dos estados das portas de saída, definição das variáveis globais e locais, inicialização das máquinas de estado, LEDs e *buzzer*, configuração do LCD, da unidade de transmissão, sem excitação dos transdutores, e da unidade de recepção com ganho mínimo de -40 dB. Em seguida, é escrita no *display* a mensagem inicial “PROJ INTERFACE ULTRASOM”, indicando que a máquina de estados principal é igual a 0. Nesse estado, o DSP fica em modo de espera, realizando a verificação das chaves a cada 100 ms, através da leitura do *buffer* 1. Quando a chave 1 é pressionada, a máquina de estados principal é alterada para o estado 1, sendo que a cada nova detecção da chave 1 o estado é incrementado uma unidade até chegar em 5. Após este estado, a máquina volta para 1, realizando um *loop* entre os estados 1 e 5. Em cada mudança de estado é apresentada no *display* a respectiva mensagem, que indica uma das cinco opções de comando que podem ser selecionadas, conforme a Tabela 11. O fluxograma geral do *firmware* de controle é apresentado na Figura 39.

Tabela 11 – Descrição das mensagens do LCD para as 5 opções de comando do sistema.

<b>Máquina de estados principal</b>	<b>Mensagem no <i>display</i></b>	<b>Comando a ser executado</b>
1	“MENU 1 – MOSTRA CONFIG”	Mostrar configuração
2	“MENU 2 – ALTERA CONFIG”	Alterar configuração
3	“MENU 3 – POSICIONA MOTOR”	Posicionar motor de passo
4	“MENU 4 – INICIA TESTE”	Iniciar teste de ultra-som
5	“MENU 5 – INICIA VARREDURA”	Iniciar varredura de ultra-som

Após selecionar a opção de comando, o *firmware* verifica a chave 2 para executar o comando selecionado. Quando a chave é pressionada a máquina de estados principal passa a operar no nível equivalente à operação de comando selecionada.

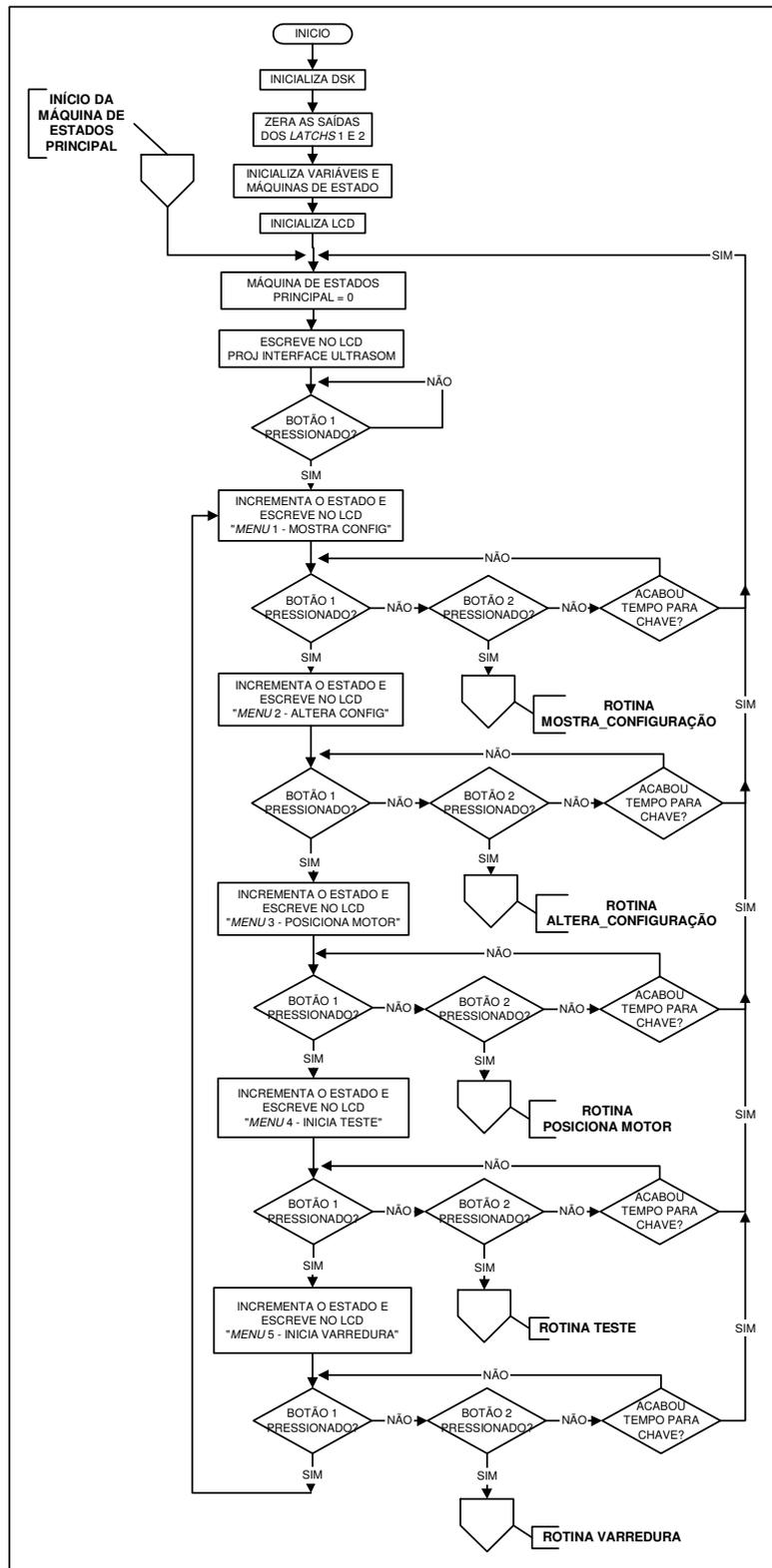


Figura 39 – Fluxograma do *firmware* de controle do sistema.

A seguir são descritas as operações realizadas nas cinco opções de comando disponíveis no sistema.

### 3.7.1 Comando “Mostrar Configuração”

O *menu* 1 (estado 1), após selecionado, é expandido em oito estados (11 ao 18), conforme a Figura 40. Esse comando tem a função de mostrar todas as configurações atuais do sistema, armazenadas na memória de dados.

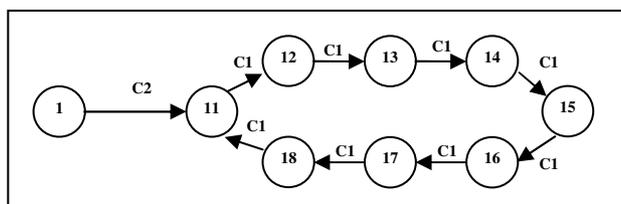


Figura 40 – Diagrama da máquina de estados principal do comando “Mostrar Configuração”.

Para cada parâmetro foi desenvolvida uma máquina de estado que especifica a configuração que deve ser mostrada no LCD. Assim sendo, a partir do estado 11, cada vez que a chave 1 é pressionada, o *firmware* escreve o parâmetro, correspondente à máquina de estados principal, na primeira linha do *display*, e o valor de configuração na segunda linha, correspondente a posição da máquina de estados do parâmetro. A Tabela 12 apresenta os parâmetros que podem ser mostrados pelo sistema.

Tabela 12 – Parâmetros do sistema e os registros das respectivas máquinas de estados.

Máquina de estados principal	Parâmetro mostrado no LCD	Registro da máquina de estados do parâmetro
11	Taxa de amostragem	estado_lcd_2
12	Taxa de repetição	estado_lcd_3
13	Número de repetições	estado_lcd_4
14	Atenuação do VCA810	estado_lcd_5
15	Atraso na recepção	estado_lcd_6
16	Modo de configuração	estado_lcd_7
17	Área a ser mapeada	estado_lcd_13
18	Resolução do mapeamento	estado_lcd_14

A Figura 41 apresenta o fluxograma da opção de comando “Mostrar Configuração”.

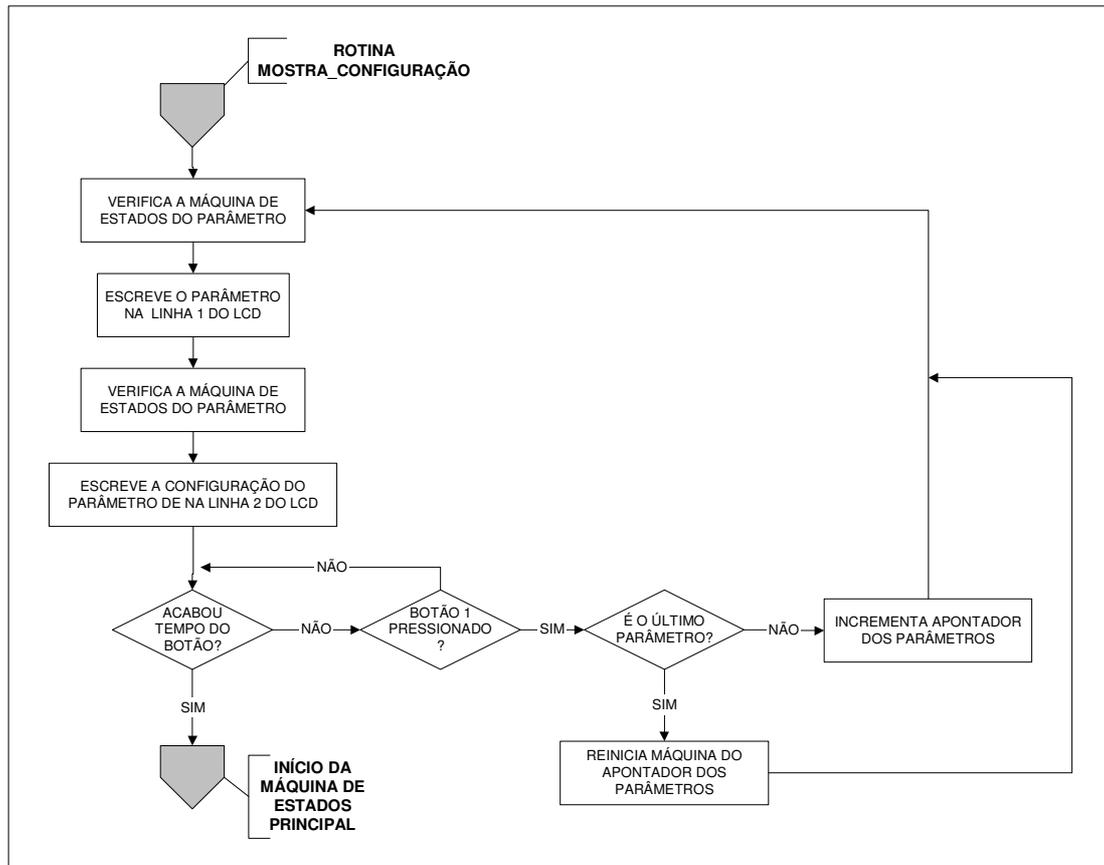


Figura 41 – Fluxograma do comando “Mostrar Configuração”.

### 3.7.2 Comando “Alterar Configuração”

Para possibilitar a configuração dos parâmetros do sistema foi desenvolvido o comando “alterar configuração”, correspondente ao *menu 2*. Esse comando, após selecionado, apresenta as mesmas mensagens no *display* do *menu 1*, porém nessa opção o usuário pode alterar as configurações dos parâmetros do sistema. Para dar maior confiabilidade ao sistema e confirmar a gravação da configuração dos parâmetros alterados, foram adicionados os estados 29 e 30. A Figura 42 mostra a seqüência da máquina de estados principal para o comando de alteração de configuração.

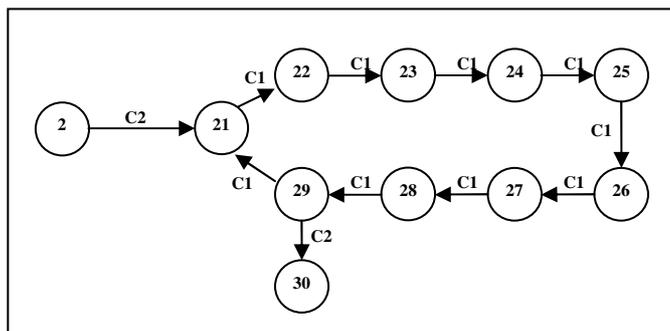


Figura 42 – Diagrama da máquina de estados principal do comando “Alterar Configuração”.

A máquina de estados do *menu 2* começa no estado 21 e termina no 30. A operação para mudar de parâmetro é a mesma descrita na seção 3.7.1, porém neste comando, quando a chave 2 é pressionada a máquina de estados do parâmetro corrente é incrementada, sendo mostrado no *display* o próximo valor de configuração. No estado 29, é apresentada a mensagem “SALVAR CONFIGURACAO ?”, indicando que o usuário pode efetivar as alterações ou voltar ao primeiro estado desse *menu*. Caso seja pressionada a chave 2, as alterações são realizadas e o estado é incrementado para 30, mostrando a mensagem “CONFIGURACAO SALVA !”. Caso contrário, a máquina de estados no *menu 2* é reiniciada em 21. Os valores possíveis de configuração para cada parâmetro são mostrados na Tabela 13 e o fluxograma do comando “Alterar Configuração” é apresentado na Figura 43.

Tabela 13 – Parâmetros e configurações disponíveis no sistema.

Estado do parâmetro	Taxa de amostragem (Hz)	Taxa de repetição (Hz)	Atenuação do VCA (dB)	Atraso na recepção (µs)	Modo de operação	Área mapeada (cm x cm)	Resolução da área mapeada (mm)
0	80M	111	-40	0	PULSO-ECO1	5 x 5	1
1	40M	125	-30	1	PULSO-ECO2	4 x 4	2
2	20M	143	-20	10	PULSO-ECO3	3 x 3	3
3	10M	167	-10	20	TX-RX1	2 x 2	4
4	5M	200	0	30	TX-RX2	1 x 1	5
5	-	250	+10	40	TX-RX3	-	-
6	-	333	+15	50	-	-	-
7	-	-	+20	60	-	-	-
8	-	-	+25	70	-	-	-
9	-	-	+30	80	-	-	-
10	-	-	+40	-	-	-	-



O DSP TMS320VC5416 possui três portas seriais McBSP que permitem a interface direta com outros dispositivos periféricos, como codificadores e conversores. O pino BCLKX0 do McBSP canal 0, que corresponde ao gerador de *clock* de sincronização de quadro, foi utilizado para permitir a geração da frequência de amostragem, para o conversor analógico para digital, até a frequência de 80 MHz. A porta de comunicação serial McBSP canal 0, é configurada através da ferramenta DSP/BIOS do *software* Code Composer e utiliza a biblioteca *chip support library* (CSL). Com isso, quando é chamada a função “taxa\_amostragem ( )”, é passado o parâmetro “divisor\_clk”, configurado conforme o valor do registro estado\_lcd\_2, para a função interna do compilador, “MCBSP\_RSETH( )”, que ajusta a frequência de amostragem do sistema através da Equação 45:

$$F_s = \frac{160MHz}{(divisor\_clk + 1)} \quad (45)$$

Onde:

- $F_s$  é a frequência de amostragem do sistema;
- $divisor\_clk$  é o registro para ajuste da frequência de amostragem do sistema.

As configurações possíveis para o parâmetro de taxa de amostragem dos sinais de ultra-som são mostradas na Tabela 14.

Tabela 14 – Configurações do parâmetro de taxa de amostragem.

Registro estado_lcd_2	Registro “divisor_clk”	Frequência de amostragem
0	1	80 MHz
1	3	40 MHz
2	7	20 MHz
3	15	10 MHz
4	31	5 MHz

### 3.7.2.2 Parâmetro “Taxa de repetição”

A taxa de repetição de excitação do transdutor transmissor é verificada quando o sistema está configurado para operar em modo de re-disparo. Esse parâmetro é utilizado nos testes com os transdutores em posição fixa, para o ajuste manual do posicionamento correto dos transdutores, de forma a permitir a maior amplitude do sinal na recepção.

Após o comando de início de teste, caso esteja configurado o re-disparo, no parâmetro “número de repetições”, o sistema entra em *loop* e realiza uma rotina atraso para sincronismo, que corresponde à frequência de repetição de excitação do transdutor transmissor. Para realizar o atraso, é verificado o valor da variável “contador\_100ms”, que é incrementada a cada interrupção do temporizador de 1 ms. Cada vez que o contador atinge o valor determinado pela Equação 46, que depende do valor configurado no registro estado\_lcd\_3, é realizado o teste de ultra-som e zerado o contador para sincronismo do próximo teste. O teste é finalizado quando qualquer chave é pressionada. Os valores possíveis para a taxa de repetição são mostrados na Tabela 15.

$$Tr = (9 - estado\_lcd\_3) * 1ms \quad (46)$$

Onde:

- $Tr$  é o período de repetição em mili-segundos do teste de ultra-som;
- $Estado\_lcd\_3$  é o registro que armazena a máquina de estado do parâmetro “taxa de repetição”.

Tabela 15 – Configurações do parâmetro de taxa de repetição.

Registro estado_lcd_3	Período de repetição	Frequência de repetição
0	9 ms	111 Hz
1	8 ms	125 Hz
2	7 ms	143 Hz
3	6 ms	167 Hz
4	5 ms	200 Hz
5	4 ms	250 Hz
6	3 ms	333 Hz

### 3.7.2.3 Parâmetro “Número de repetições”

O teste com os transdutores em posição fixa pode ser realizado com 1 pulso único ou com pulsos síncronos de excitação do transdutor transmissor sendo gerados em uma frequência configurada. O parâmetro “número de repetições” é utilizado para habilitar/desabilitar o re-disparo do transistor de potência para geração do pulso de alta amplitude de excitação do transdutor transmissor, conforme o registro estado\_lcd\_4, apresentado na Tabela 16. O parâmetro “taxa de repetição” é somente habilitado quando o parâmetro “número de repetições” está configurado para re-disparo.

Tabela 16 – Configurações do parâmetro de número de repetições.

Registro estado_lcd_4	Número de repetições
0	1 Pulso
1	Re-disparo

### 3.7.2.4 Parâmetro “Atenuação do VCA”

O controle de ganho de tensão, na unidade de recepção, é realizado pelo amplificador com ganho controlado por tensão VCA810 (U10). Para que o DSP controle a tensão que deve ser aplicado ao pino de controle do VCA foi adicionado um conversor digital para analógico (DAC), com amplificadores operacionais para ajuste fino da tensão de saída analógica, realizado por um *trimpot*. Considerando o valor do *trimpot* de aproximadamente 3,72 k $\Omega$ , o ganho total de tensão do circuito dos amplificadores operacionais é de -406,35 mV. Com base nesse valor, foram selecionados 11 valores de ganho, entre a faixa de -40 dB e +40 dB, calculada a tensão necessária que deve ser aplicada ao VCA para cada valor de ganho do circuito de recepção, e utilizando a Equação 43, calculado o valor digital que deve ser aplicado ao DAC. No *firmware*, quando é chamada a função “config\_vca ( )”, é verificado o registro estado\_lcd\_5, que armazena a máquina de estados do parâmetro “atenuação VCA” e aplicado o valor digital, equivalente ao ganho configurado, no circuito conversor D/A, conforme mostra a Tabela 17.

Tabela 17 – Valores dos pesos equivalentes às configurações do parâmetro de atenuação do amplificador VCA810.

<b>Registro estado_lcd_5</b>	<b>Ganho de tensão do VCA</b>	<b>Tensão de saída do circuito amplificador</b>	<b>Peso equivalente em hexadecimal para o DAC</b>
0	-40 dB	0,000 V	00 h
1	-30 dB	-0,250 V	08 h
2	-20 dB	0,500 V	10 h
3	-10 dB	-0,750 V	18 h
4	0 dB	-1,000 V	1F h
5	+10 dB	-1,250 V	27 h
6	+15 dB	-1,375 V	2C h
7	+20 dB	-1,500 V	2F h
8	+25 dB	-1,625 V	34 h
9	+30 dB	-1,750 V	37 h
10	+40 dB	-2,00 V	3F h

### 3.7.2.5 Parâmetro “Atraso de recepção”

O parâmetro “atraso de recepção” é utilizado na configuração do atraso, após o início do teste com transdutores em ponto fixo, para habilitação da memória FIFO e armazenamento dos dados digitalizados pelo conversor A/D. Esse parâmetro tem a função de atrasar o armazenamento dos sinais digitalizados, para que em testes com os transdutores posicionados de forma que o sinal de ultra-som demore a ser captado, a memória FIFO ainda receba o sinal digitalizado e não seja preenchida somente com ruído. Na função “realiza\_teste ( )”, primeiro é enviado o pulso para o circuito de transmissão e em seguida passado o valor do registro estado\_lcd\_6, que armazena a máquina de estados para a configuração do parâmetro “atraso de recepção”, para a função “atraso\_recepcao ( )”. Nessa função é realizado um “loop” de atraso que equivale ao valor do registro estado\_lcd\_6, conforme é apresentado na Tabela 18.

Tabela 18 – Configurações do parâmetro de atraso na recepção.

Registro estado_lcd_6	Atraso na recepção
0	Sem atraso
1	1 $\mu$ s
2	10 $\mu$ s
3	20 $\mu$ s
4	30 $\mu$ s
5	40 $\mu$ s
6	50 $\mu$ s
7	60 $\mu$ s
8	70 $\mu$ s
9	80 $\mu$ s

### 3.7.2.6 Parâmetro “Modo de operação”

A configuração de operação dos transdutores é definida pelo parâmetro “modo de operação”. Esse parâmetro permite a configuração do modo pulso-eco dos dois transdutores ou transmissão-recepção, nos dois sentidos. Para realizar essa seleção o *firmware* controla o acionamento de dois relés com saídas de dois contatos. O registro estado\_lcd\_7 é utilizado para armazenar o estado de configuração do parâmetro e comandar os relés que são atracados/detracados, conforme a Tabela 19. São utilizadas as abreviações T1 e T2 para indicar os transdutores 1 e 2.

Tabela 19 – Configurações do parâmetro de modo de operação.

<b>Registro estado_lcd_7</b>	<b>Modo de operação</b>	<b>Estado do relé 1</b>	<b>Estado do relé 2</b>	<b>Operação</b>
0	PULSO-ECO1	0	0	T1 no modo pulso-eco
1	PULSO-ECO2	1	1	T2 no modo pulso-eco
2	PULSO-ECO3	0	0	Não implementado
3	TX-RX1	0	1	T1 como transmissor e T2 como receptor
4	TX-RX2	1	0	T2 como transmissor e T1 como receptor
5	TX-RX3	0	1	Não implementado

### 3.7.2.7 Parâmetro “Área de mapeamento”

No teste de varredura para mapeamento de área alvo, o registro estado\_lcd\_13 armazena o apontador de configuração do parâmetro “área de mapeamento”. Esse valor é verificado na função “varredura ( )”, que realiza o posicionamento dos transdutores para o teste de ultra-som em cada ponto da área alvo, com resolução definida através do valor configurado para o parâmetro “resolução de mapeamento”. As áreas possíveis para configuração do mapeamento são apresentadas na Tabela 20.

Tabela 20 – Configurações do parâmetro de área de mapeamento.

<b>Registro estado_lcd_13</b>	<b>Área de mapeamento</b>
0	5 cm x 5 cm
1	4 cm x 4 cm
2	3 cm x 3 cm
3	2 cm x 2 cm
4	1 cm x 1 cm

### 3.7.2.8 Parâmetro “Resolução do mapeamento”

Para possibilitar várias análises no teste de varredura para mapeamento de área alvo, o sistema permite a configuração do parâmetro “resolução de mapeamento”. Essa configuração é armazenada no registro estado\_lcd\_14, sendo verificada na função “varredura ( )”. Com isso, cada valor de configuração do parâmetro “área de mapeamento”, que corresponde à área de mapeamento, pode ser mapeado com qualquer uma das resoluções mostradas na Tabela 21.

Tabela 21 – Configurações do parâmetro de resolução de mapeamento.

<b>Registro estado_lcd_14</b>	<b>Resolução do mapeamento</b>
0	Passo de 1 mm
1	Passo de 2 mm
2	Passo de 3 mm
3	Passo de 4 mm
4	Passo de 5 mm

### 3.7.3 Comando “Posicionar Motor”

Nos testes de mapeamento de uma região alvo é necessário que os transdutores estejam dispostos na posição correta e sejam movimentados com resolução precisa. O comando “posicionar motor” (*menu 3*) permite corrigir o posicionamento de três motores de passo, no sentido horário ou anti-horário, especificando a distância de correção de forma automática, em milímetros, ou de forma manual. A seqüência da máquina de estados para esse comando é apresentada na Figura 44.

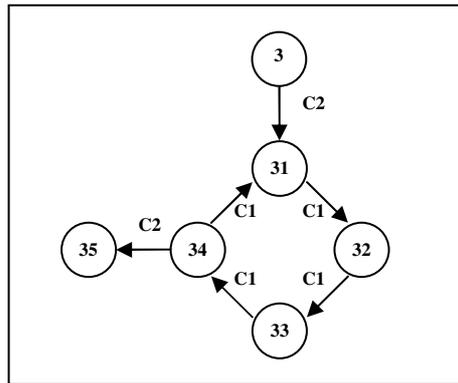


Figura 44 - Diagrama da máquina de estados principal do comando “Posicionar Motor”.

Utilizando o mesmo algoritmo de programação do comando de alteração das configurações do sistema, a seleção do parâmetro a ser mostrado é realizada pela chave 1 e a alteração da configuração pela chave 2. Os parâmetros que podem ser configurados para o posicionamento dos motores são apresentados na Tabela 22. No estado de máquina 34, após realizar as alterações, o *display* apresenta a mensagem “INICIAR MOTOR?”, indicando que o sistema pode iniciar o posicionamento do motor selecionado ou voltar para o estado inicial desse comando. Quando a chave 2 é pressionada, a operação de posicionamento do motor é realizada, incrementando o estado para 35. Com isso, é apresentada no *display* a mensagem “ALINHANDO MOTOR” até que a operação seja finalizada.

Tabela 22 – Parâmetros do comando de posicionamento dos motores de passo.

Máquina de estados principal	Parâmetro a ser mostrado no <i>display</i>	Registro que armazena a máquina de estados do parâmetro
31	Motor selecionado	estado_lcd_9
32	Sentido de movimento	estado_lcd_10
33	Distância de movimento	estado_lcd_11
34	Confirmação de início de posicionamento	estado_lcd_12

### 3.7.3.1 Parâmetro “Seleciona motor”

O parâmetro “seleciona motor” é utilizado para selecionar qual dos três motores de passo, que podem ser controlados pelo sistema, deve ser posicionado. O registro estado\_lcd\_9 armazena a máquina de estados do parâmetro que é passada para a função “motor\_passo ( )” quando é iniciado o posicionamento do motor de passo. Os valores de configuração do parâmetro são mostrados na Tabela 23.

Tabela 23 - Configurações do parâmetro de seleção de motor de passo.

<b>Registro estado_lcd_9</b>	<b>Motor selecionado</b>
0	Eixo x
1	Eixo y
2	Eixo z

### 3.7.3.2 Parâmetro “Sentido motor”

Após a seleção do motor a ser posicionado deve-se configurar o sentido de movimento através da configuração do parâmetro “sentido motor”. O registro estado\_lcd\_10 armazena a máquina de estados do parâmetro que possui apenas dois estados (Tabela 24), sendo verificado somente na função “motor\_passo ( )”.

Tabela 24 - Configurações do parâmetro de sentido de movimento do motor de passo.

<b>Registro estado_lcd_10</b>	<b>Motor selecionado</b>
0	Horário
1	Anti-horário

### 3.7.3.3 Parâmetro “Distância”

O parâmetro “distância” é utilizado para automatizar o valor de correção para o posicionamento do motor de passo, na posição inicial, superior à esquerda, da área alvo. O

valor do registro estado\_lcd\_11, que armazena a máquina de estados, correspondente à distância de movimento do motor de passo (Tabela 25), é verificado na função “motor\_passo ( )”. Na função, conforme o valor do registro, o *firmware* realiza o movimento do motor controlando o número de passos enviado até completar a distância configurada. O número de passos é realizado com base na relação em que 1 mm de deslocamento equivale a 108 passos do motor. Para realizar o posicionamento do motor selecionado com o parâmetro “distância” na configuração ajuste manual, a chave 2 deve ser pressionada até que os transdutores fiquem posicionados no ponto desejado para início do teste de varredura. Quando os transdutores chegarem nesse ponto a chave deve ser solta, parando o motor.

Tabela 25 – Configurações do parâmetro de distância de deslocamento.

<b>Registro estado_lcd_11</b>	<b>Distância (mm)</b>	<b>Número de passos</b>
0	1	108
1	5	540
2	10	1080
3	50	5400
4	100	10800
5	Ajuste manual (1 mm)	108

#### 3.7.3.4 Comando “Iniciar motor”

O comando “iniciar motor”, que equivale ao estado 34 da máquina de estados principal, é utilizado após o usuário realizar todas as configurações necessárias para o posicionamento do motor. Quando o comando é selecionado, a máquina de estados principal é incrementada, sendo chamada a função “motor\_passo ( )” que realiza o posicionamento do motor de passo. Na função, inicialmente são verificados os registros estado\_lcd\_11 e estado\_lcd\_9, que correspondem respectivamente aos parâmetros “distância” e “seleciona motor”. Após isso, é verificado o registro estado\_lcd\_10, que corresponde à máquina de estados do parâmetro “sentido” e enviado para a interface de saída *latch* 1, a cada 10 ms, que equivale a uma taxa de 100 Hz, o valor do passo correto para movimentar o motor. Essa operação é realizada até completar o número de passos equivalente à distância configurada através do registro estado\_lcd\_11. Na operação de ajuste manual, após finalizar o movimento

de 1 mm é testado o estado da chave 2. Caso a chave esteja pressionada, o contador de passos é carregado novamente com o valor equivalente à distância de 1 mm, repetindo este processo até que a chave seja solta. Caso contrário, a operação de posicionamento do motor é finalizada e o *firmware* volta para o estado 0 da máquina de estados principal.

#### 3.7.4 Comando “Iniciar Teste”

Após realizar as alterações das configurações desejadas através do comando “alterar configuração”, o teste de ultra-som com transdutores em posição fixa pode ser iniciado selecionando-se o comando “Iniciar teste” (*menu* 4). O teste é iniciado quando a máquina de estados principal é igual a 4 e a chave 2 é pressionada. Com isso, a máquina de estados geral é alterada para 41.

O fluxograma da função “realiza\_teste ( )”, que representa o comando de início de teste, é apresentado na Figura 45. Inicialmente é enviado o nível 1 para a entrada do circuito monoestável, disparando o pulso de excitação do transdutor transmissor, realizado o atraso configurado através do parâmetro “atraso de recepção” e habilitação da memória FIFO, para recepção dos dados digitalizados. Em seguida, é chamada a rotina de atraso, dependente da frequência de amostragem, para esperar que a memória FIFO, de 4096 endereços, seja completamente preenchida. Após o atraso, é testado o estado do pino “FULL FLAG” da FIFO, que em nível lógico 1 representa que a memória está cheia, indicando operação realizada com sucesso. Caso o nível lógico do pino seja 0, é sinalizada a falha na leitura da FIFO e finalizado o teste. Em seguida, com a FIFO preenchida, é zerado o apontador do *buffer* de dados para leitura da memória e verificado qual o tipo de teste que está sendo realizado.

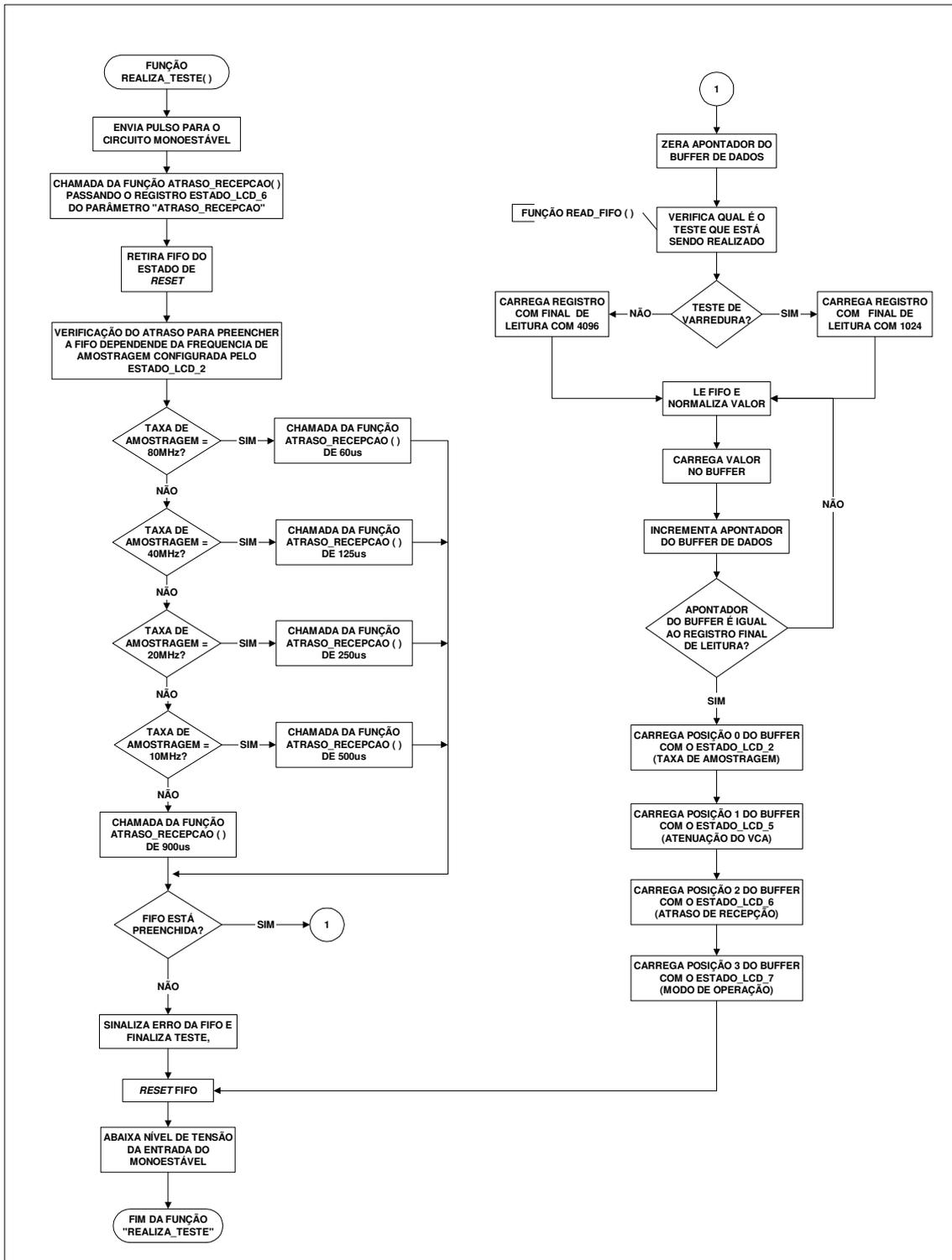


Figura 45 – Fluxograma do comando “Iniciar Teste”.

Para o teste com transdutores em posição fixa, o tamanho do *buffer*, representado pela *string* “FIFO\_buffer”, é configurado para 4096 amostras e no teste de varredura o tamanho do *buffer* é configurado para 1024 amostras. Em seguida, o *firmware* realiza a leitura da FIFO,

normaliza o valor lido, que é enviado pelo conversor A/D na forma de complemento de 2, e armazena o resultado no *buffer* de dados indexado pelo apontador do *buffer*. Com isso, o apontador é incrementado e a operação é repetida até que o valor do apontador seja igual ao registro que armazena o tamanho do *buffer* de dados (1024 ou 4096). Depois de finalizada a operação de leitura da FIFO, o valor de configuração dos parâmetros principais são carregados nos endereços iniciais do *buffer* para permitir a análise em um microcomputador, conforme a Tabela 26.

Tabela 26 – Valores de configurações gravados no *buffer* de dados para análise.

Posição no “buffer”	Registro carregado	Parâmetro equivalente
FIFO_buffer [0]	estado_lcd_2	“Taxa de amostragem”
FIFO_buffer [1]	estado_lcd_5	“Atenuação do VCA”
FIFO_buffer [2]	estado_lcd_6	“Atraso na recepção”
FIFO_buffer [3]	estado_lcd_7	“Modo de operação”
FIFO_buffer [4]	estado_lcd_13	“Área de mapeamento”
FIFO_buffer [5]	estado_lcd_14	“Resolução do mapeamento”

### 3.7.5 Comando “Iniciar Varredura”

O comando “iniciar varredura” é selecionado quando a máquina de estados principal é igual a 4 e a chave 2 é pressionada. Com isso, o estado principal é alterado para 51 iniciando o teste de varredura dos transdutores para obter o mapeamento dos pontos em uma área alvo quadrada, no plano X-Y, através da chamada da função “varredura( )”. Antes do teste, os parâmetros de área de mapeamento e resolução da distância dos pontos de aquisição, para o posicionamento dos transdutores, devem ser configurados através do comando “alterar configuração” e o posicionamento inicial dos transdutores para o teste deve ser corrigido com o comando “posicionar motor”.

A Figura 46 apresenta o fluxograma da função “varredura( )”. Na função, inicialmente são verificados os valores dos registros estado\_lcd\_13 e estado\_lcd\_14, que correspondem à área de mapeamento e à resolução dos pontos de aquisição.

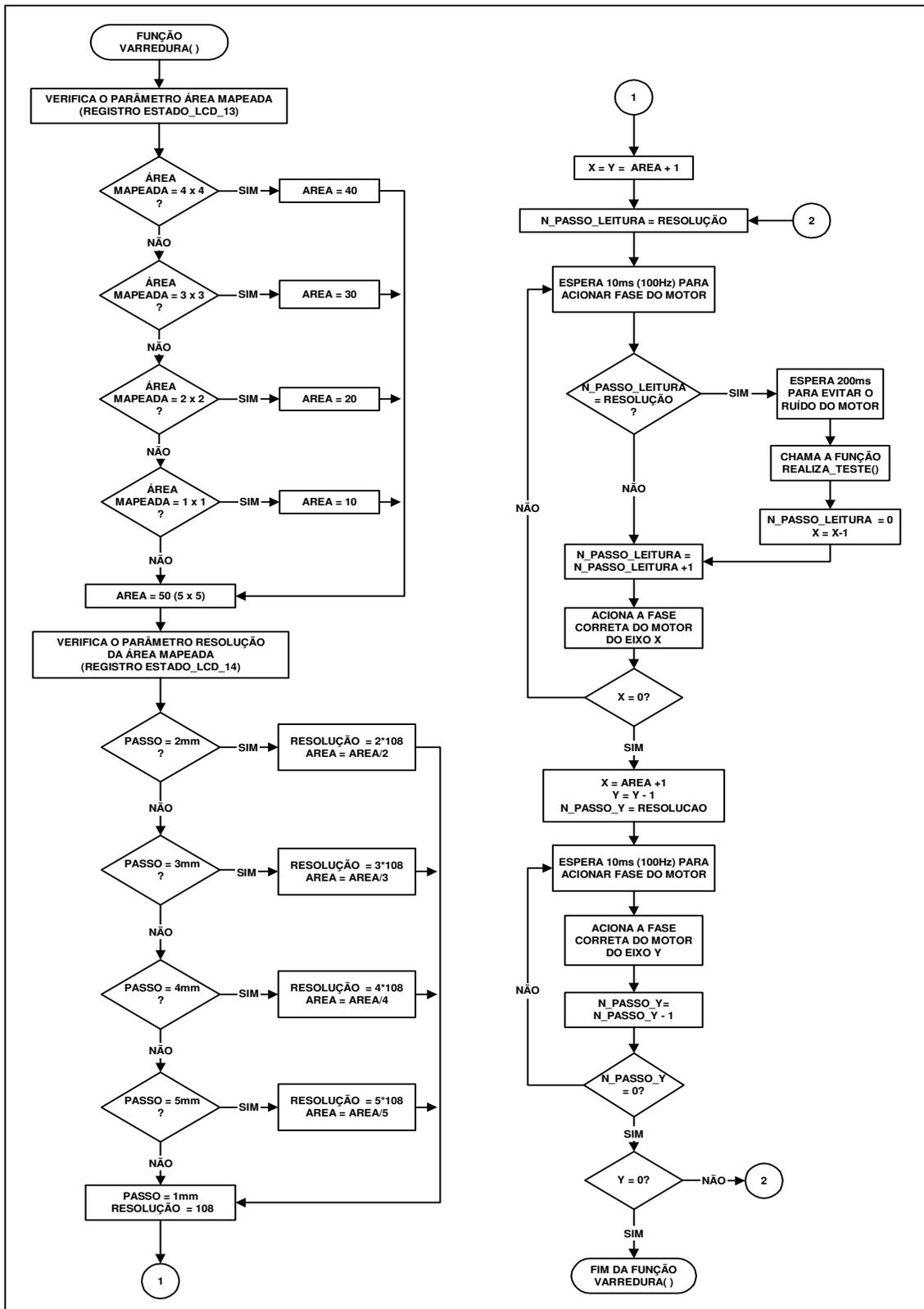


Figura 46 – Fluxograma do comando “Iniciar Varredura”.

Nesta função, os registros de contagem dos passos dos eixos X (registro x) e Y (registro y) são zerados. Após isso, é iniciado o posicionamento do motor do eixo X,

decrementando o registro x a cada passo do motor e realizadas as aquisições dos sinais nos pontos em que o registro n\_passos\_leitura for igual ao valor da resolução configurada, sendo que após cada leitura o registro é zerado. Quando o contador x chegar em 0, indicando que o motor do eixo X chegou ao final da linha, o registro y é decrementado e o contador n\_passos\_y recebe o valor da resolução. Com isso, o motor do eixo Y é acionado, posicionando os transdutores na próxima linha, decrementando o registro n\_passos\_y a cada passo do motor até que seja igual a zero. A função é finalizada quando o valor dos registros y e n\_passo\_y forem iguais a zero, indicando que o sistema realizou a aquisição de todos os pontos definidos. A Tabela 27 apresenta o número total de aquisições para todas as configurações de área e resolução de mapeamento do sistema e a Figura 47 mostra o sentido de movimento dos motores de passo nos eixos X e Y.

Tabela 27 – Número de pontos de aquisição em relação à área e resolução.

Área de mapeamento	Resolução				
	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm	5 mm
1 cm x 1 cm	121	36	16	9	9
2 cm x 2 cm	441	121	49	36	25
3 cm x 3 cm	961	256	121	64	49
4 cm x 4 cm	1681	441	196	121	81
5 cm x 5 cm	2601	676	289	169	121

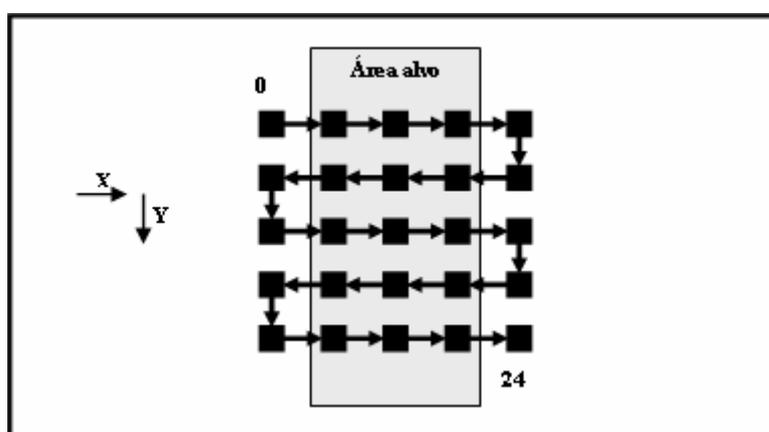


Figura 47 - Exemplo de mapeamento dos pontos do plano X-Y para área de 2 cm x 2 cm com resolução de 5 mm (total de 25 pontos).

### 3.8 TRANSFERÊNCIA DO *BUFFER* DE DADOS DIGITALIZADOS

Para permitir a transferência de dados da memória RAM é necessário que o controlador JTAG da placa DSK esteja conectada a um microcomputador, via interface de comunicação USB. No microcomputador, deve estar instalada a versão 2 do *software* de desenvolvimento Code Composer Studio, para a placa DSK TMS320VC5416, que acompanha o *kit*.

Após conectar as fontes de alimentação nas respectivas placas do sistema, e o cabo USB entre a placa mãe DSK e o microcomputador, o *software* Code Composer pode ser iniciado. Para abrir o projeto com o código fonte, deve-se selecionar o *menu Project*, da barra de tarefas do *software*, e escolher o projeto “interface.pjt”. Ao iniciar o projeto, abre-se também uma janela vertical posicionada do lado esquerdo da tela com a lista de todos os diretórios e arquivos necessários para a compilação do projeto. O arquivo principal dessa tela, apresentada na Figura 48, é o “main.c” e contém todo o código fonte de programação em linguagem C para o sistema.

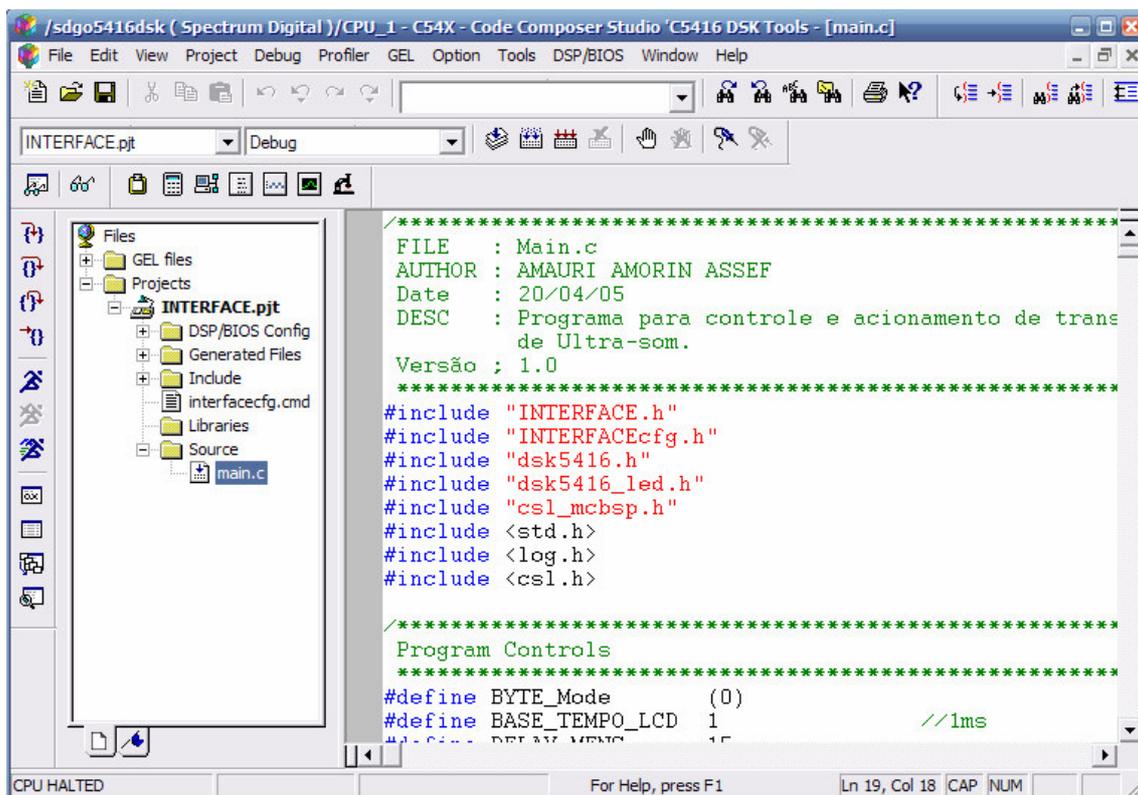


Figura 48 – Tela principal do *software* Code Composer.

Para compilar o projeto e verificar se não existem erros de programação ou sintaxe é utilizado o comando *Build* do *menu Project*. Antes de realizar a transferência de dados entre a placa mãe DSK e o microcomputador, é necessário que o código fonte do programa seja transferido para a placa. A transferência é realizada através do *menu File*, na opção *Load Program ...*, com a seleção do arquivo já compilado “interface.out”. Após o comando de carga, o programa é iniciado através da opção *Run*, do *menu Debug*. O próximo passo, é inserir a ferramenta *probe point*, que é utilizada no sistema de depuração do Code Composer para indicar o ponto inicial da gravação de dados em um arquivo externo, na linha de código da função “read\_FIFO ( )”, mostrada na Figura 49. Com isso, quando a execução do código chegar na linha da função apontada, é atualizado o conteúdo do arquivo conectado ao *probe point*. Para inserir um arquivo para gravação do *buffer* de dados recebidos da memória FIFO é selecionado o *menu File*, opção *File I/O ...*. Na caixa *File I/O* deve-se selecionar a opção *File output* e clicar em *Add File* para adicionar o arquivo de saída que irá receber o *buffer* de dados. Na seqüência, é aberta a caixa *File Output* na qual deve ser escrito o nome do arquivo, com extensão *dat*, para gravação de dados do tipo inteiro (entre -32768 e 32767).

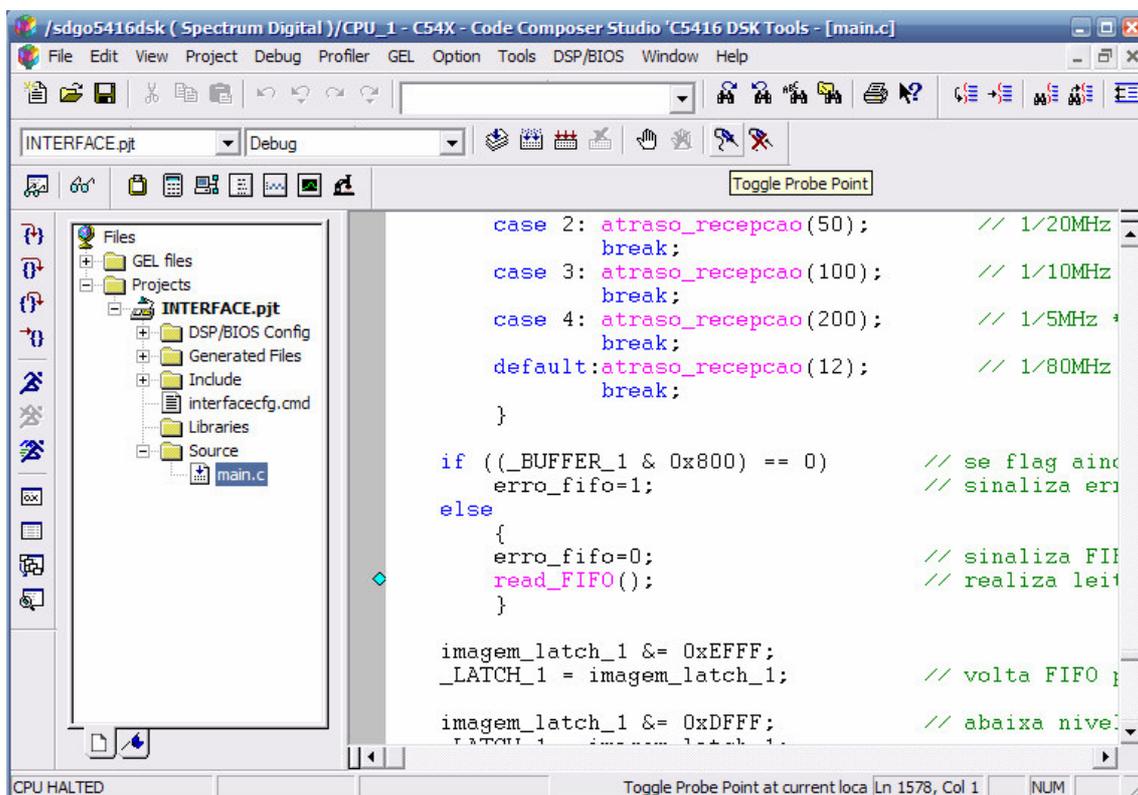


Figura 49 – Tela com inserção da ferramenta *probe point* na função “read\_FIFO( )”.

Após a criação do arquivo de saída, deve-se preencher as caixas de endereço (*Address*) com o nome do vetor “FIFO\_buffer”, de comprimento do vetor, que pode ser 1024 (teste de varredura) ou 4096 (teste simples), como é mostrado na Figura 50 e clicar em *Add Probe Point* para conectar o arquivo externo ao *probe point*. Com essa operação, é aberta a caixa *Break/Probe Points*, mostrada na Figura 51, para conectar o arquivo externo “buffer.dat” ao *probe point* inserido na linha de chamada da função “read\_FIFO( )”. A conexão é feita selecionando o arquivo “buffer.dat” na caixa *Connect To* e clicado em *Add*, para adicionar o *probe point*. Após a operação deve-se clicar em *OK* nas duas caixas abertas e finalizar a operação. Quando a execução do programa entrar na função apontada pelo *probe point* o arquivo “buffer.dat” será aberto para escrita dos dados gravados no vetor “FIFO\_buffer”. A cada nova entrada na função o arquivo recebe os dados do vetor a partir do último dado, sem sobre-escrita das informações. O arquivo “buffer.dat” é fechado quando o *probe point* é retirado da linha marcada ou encerrado o *software* Code Composer.

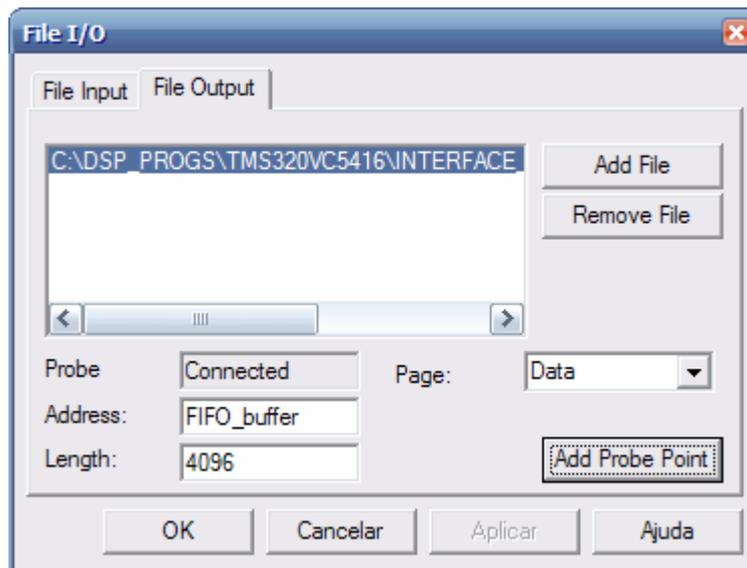


Figura 50 – Tela da caixa *File I/O* para criação de arquivo de saída.

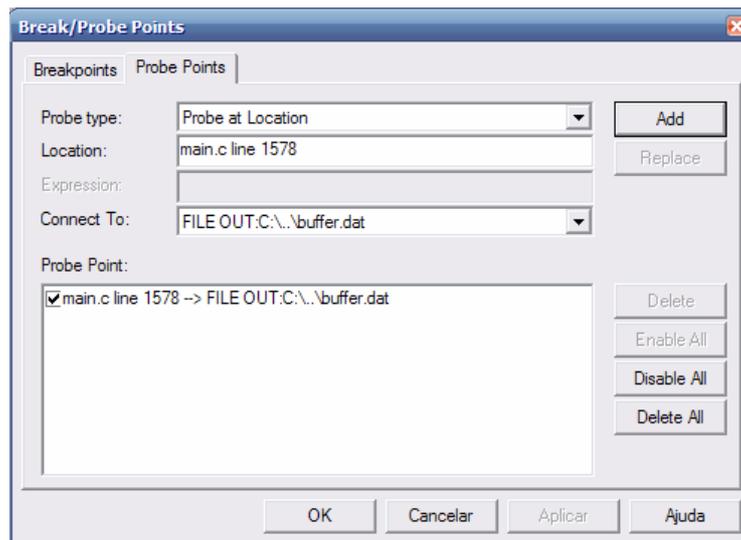


Figura 51 – Tela da caixa para conexão do *probe point* com o arquivo de saída.

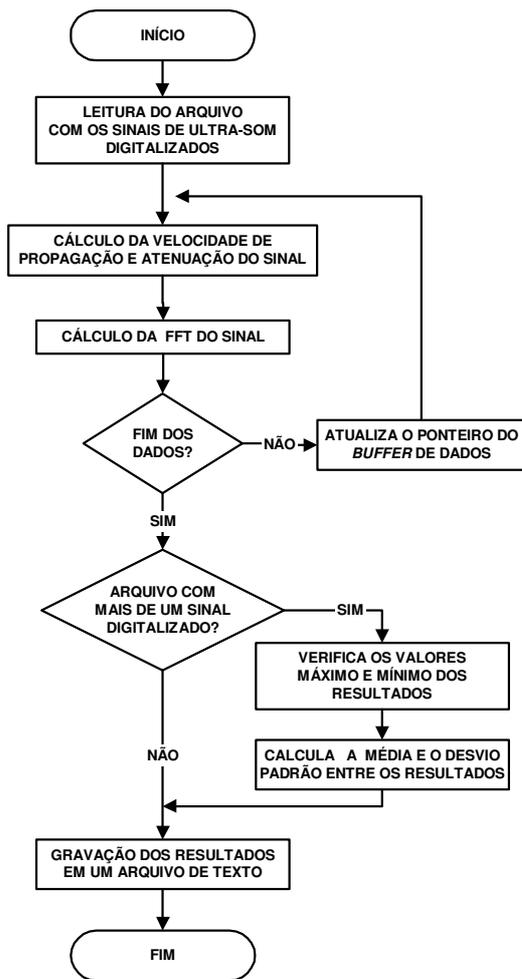
### 3.9 SOFTWARES DE PROCESSAMENTO E ANÁLISE DOS DADOS

Os *softwares* para processamento e análise dos dados enviados pelo sistema de aquisição são formados por rotinas escritas para serem executadas no Matlab Versão 6.5 (Math Works Inc.), que realizam as seguintes tarefas:

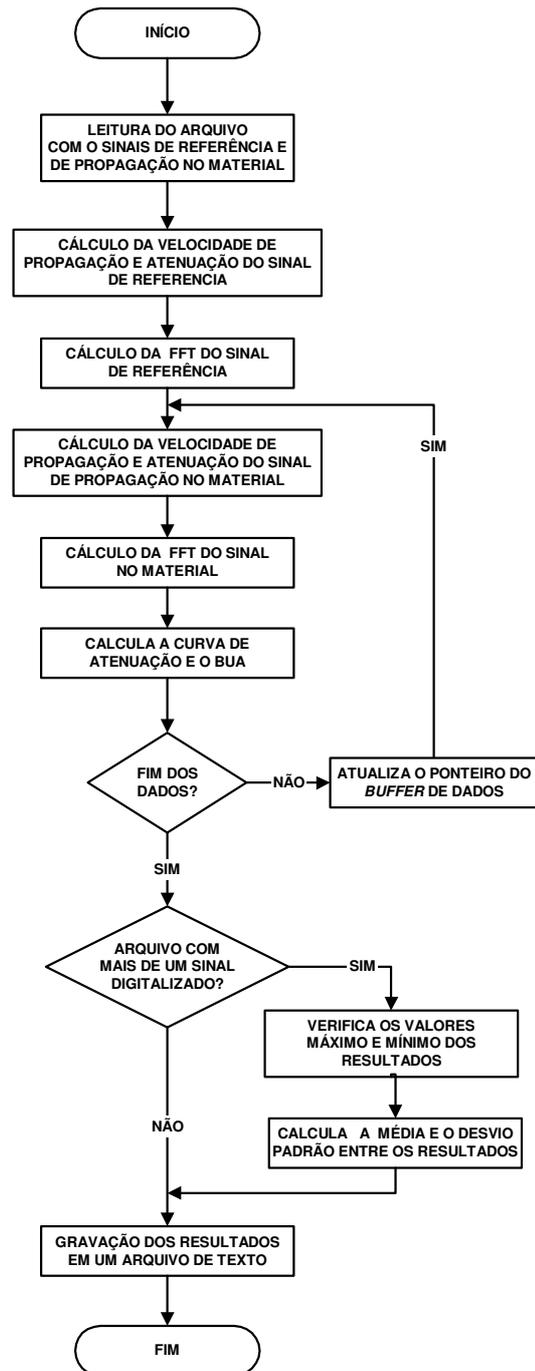
- 1) Tratamento dos sinais digitalizados pela unidade de recepção do sistema;
- 2) Cálculo dos parâmetros de velocidade e atenuação em função da distância do sinal de propagação no meio e atenuação em banda larga (BUA);
- 3) Análises estatísticas.

Na Figura 52(a) é apresentado o fluxograma da rotina para realizar o tratamento dos sinais para as técnicas de transmissão-recepção e pulso-eco. A Figura 52(b) apresenta o fluxograma para cálculo da curva de atenuação e do BUA do material.

Foram desenvolvidas três versões de arquivos para processamento dos sinais, apresentados na Tabela 28. Os três arquivos utilizam basicamente as mesmas funções, sendo as principais o cálculo da FFT e da Transformada de Hilbert dos sinais adquiridos. Como os arquivos são muito extensos, apenas o conteúdo do arquivo BUA.M, que utiliza todas as funções implementadas para o processamento e análise dos sinais ultra-sônicos, é apresentado no Apêndice D.



(a)



(b)

Figura 52 – (a) Fluxograma para tratamento dos sinais para os métodos transmissão-recepção e pulso-eco; (b) fluxograma do processamento da curva de atenuação e cálculo do BUA.

Tabela 28 – Nome dos arquivos de processamento e análise de dados.

<b>Arquivo</b>	<b>Tipo de processamento</b>
TRANSMISSAO.M	Cálculos para o método transmissão-recepção
PULSO.M	Cálculos para o método pulso-eco
BUA.M	Cálculos da curva de atenuação e BUA

### 3.10 EQUIPAMENTOS E MATERIAIS UTILIZADOS NOS TESTES

Os transdutores de ultra-som a serem utilizados no sistema de aquisição para realização dos testes devem apresentar as seguintes características (MAIA, 2001):

- a) Boa isolamento elétrica: para evitar riscos de choque elétrico nos testes realizados na água e no leite;
- b) Banda de passagem de frequência ampla com frequência central em torno de 500 kHz: para que se possa determinar a atenuação em banda larga (BUA) das ondas ultrassônicas que se propagam em materiais com elevado índice de atenuação (por exemplo: o osso e pedra pome) e também para minimizar erros no cálculo da velocidade de propagação do som, já que o transdutor do tipo banda larga gera um pulso de duração menor que o tipo banda estreita;
- c) Campo acústico estreito: para que a maior parte da energia gerada pelo transdutor atravesse apenas a área a ser analisada e os sinais captados pelo transdutor receptor sejam de maior amplitude, ou seja, maior relação sinal ruído.

Tendo em vista os aspectos descritos anteriormente, optou-se pela utilização de dois transdutores da empresa Panametrics (modelo V318), Figura 53, com frequência central de 500 kHz, diâmetro da área ativa de 19 mm e diâmetro externo de 25,4 mm. Para realização dos testes cada transdutor foi conectado em um cabo blindado de 50  $\Omega$ , com aproximadamente 2 metros de comprimento.



Figura 53 – Transdutores de ultra-som da marca Panametrics, modelos V318, utilizados nos testes do sistema.

Para os testes de caracterização e análise de desempenho do sistema desenvolvido foram utilizados um gerador de sinais de RF da marca GW, modelo GRG-450B, com frequência máxima de 50 MHz e um osciloscópio digital TEKTRONIX modelo TDS2022, com taxa de amostragem máxima de 200 MHz. Além disto, foi utilizado um microcomputador com processador AMD Athlon XP, com frequência de operação de 2,4 GHz, equipado com duas interfaces de comunicação serial USB.

Os testes para as medidas das características das ondas ultra-sônicas foram realizados em um tanque de plástico, com os transdutores imersos em aproximadamente 25 litros de água, com as temperaturas do meio medidas por um termômetro de mercúrio. Além da água, como meio de propagação da onda ultra-sônica, foram realizados testes com 7 litros de leite integral da marca Tirol em embalagem longa vida.

A Figura 54 mostra o esquema montado para realização dos testes de aquisição de dados para o método transmissão-recepção. Nesta configuração, a unidade de transmissão do sistema excita o transdutor transmissor que emite os pulsos ultra-sônicos que se propagam através do meio e são captados pelo transdutor receptor, acoplado à unidade de recepção do sistema.

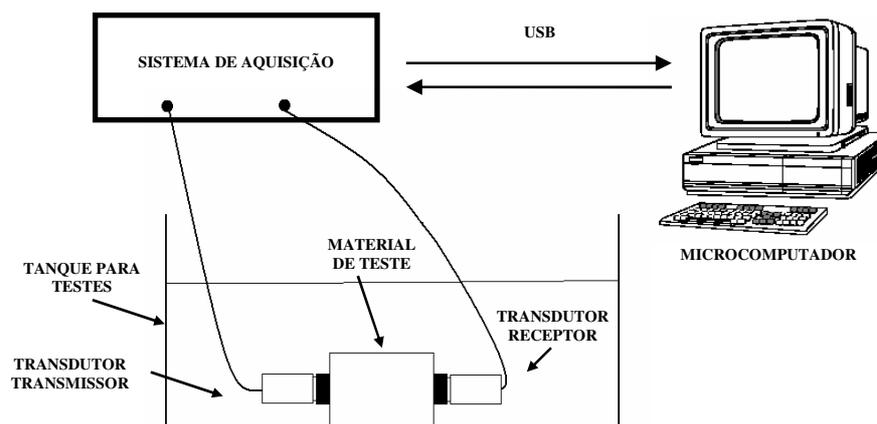


Figura 54 - Configuração utilizada para realizar os testes do sistema no modo de operação transmissão-recepção.

A Figura 55 apresenta o esquema utilizado para a realização dos testes de aquisição de dados para o método pulso-eco. Nesta configuração é utilizado apenas um transdutor, imerso no tanque e colocado em contato com o material a ser analisado. O transdutor opera primeiramente como transmissor dos sinais ultra-sônicos e em seguida como receptor, captando os ecos gerados na propagação da onda no material de teste.

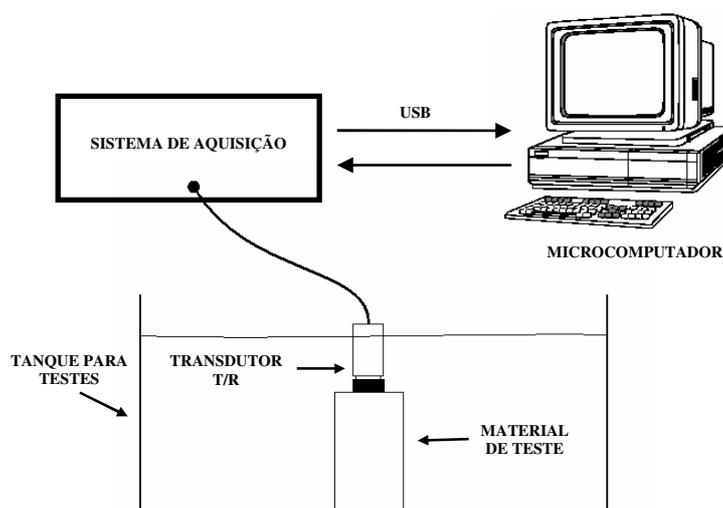


Figura 55 – Configuração utilizada para os testes do sistema no modo de operação pulso-eco.

Para dar confiabilidade aos testes e maior precisão nas medidas, foi utilizada uma peça de acrílico circular com furos para suporte e posicionamento frontal dos transdutores, conforme mostra a foto da Figura 56.

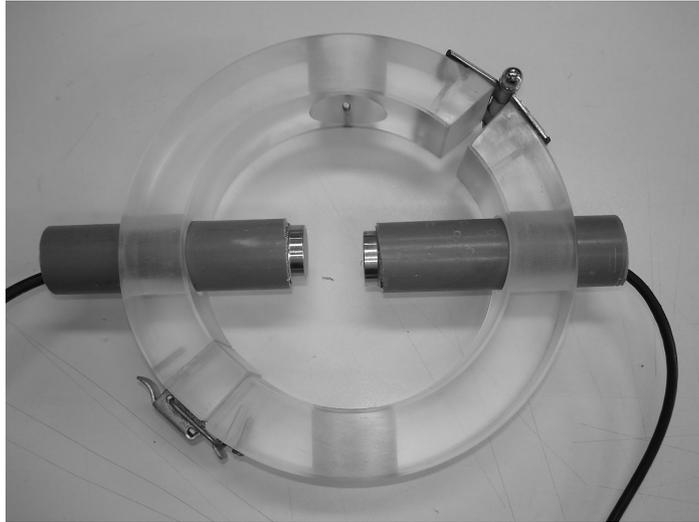


Figura 56 – Conjunto suporte para posicionamento dos transdutores.

Os transdutores foram colocados dentro de dois pedaços de cano de PVC para melhorar o posicionamento e permitir a maior captação do sinal ultra-sônico.

Todos os materiais já estavam disponíveis no Laboratório de Engenharia Biomédica, porém a composição precisa dos mesmos é desconhecida, como por exemplo, tipo exato e a pureza do material. Os materiais utilizados para os testes são descritos a seguir:

- a) Tarugo de acrílico circular com diâmetro de 5 cm e espessura de 5 cm;
- b) Pedra pome retangular com dimensões 5,2 x 8,4 cm e espessura de 2 cm;
- c) Tarugo de alumínio circular com diâmetro de 6,2 cm e espessura de 3,2 cm.

## CAPÍTULO 4

### 4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nos testes em bancada, após a montagem das placas de circuito impresso e desenvolvimento do *software* com o código fonte do DSP, para a implementação do sistema de aquisição e processamento de sinais de ultra-som.

#### 4.1 TELAS DO LCD PARA APRESENTAÇÃO DE INFORMAÇÕES DO SISTEMA

A Figura 57 apresenta todas as telas de mensagem do sistema que podem ser apresentadas no LCD. As mensagens estão dispostas em colunas, sendo cada estado correspondente da máquina de estados principal apresentado ao lado de cada caixa de mensagem. Na primeira coluna, à esquerda, é apresentada a mensagem padrão do sistema, que equivale ao estado 0. Na segunda coluna, estão dispostas as opções de comando para mostrar e alterar as configurações dos parâmetros do sistema, posicionar os motores de passo, iniciar o teste com transdutores em posição fixa e iniciar o teste de varredura para mapeamento de área alvo. Após a seleção de uma das opções de comando, o LCD apresenta as mensagens da terceira coluna, mostrando as informações e as configurações possíveis para cada parâmetro, seleção das configurações para posicionamento dos motores de passo e as mensagens de início dos testes de ultra-som. Na última coluna são apresentadas as mensagens de confirmação para a opção de comando de alteração de configurações, a mensagem que indica a operação de posicionamento automático dos transdutores, através dos motores de passo, e de erro, caso ocorra, na operação de leitura do *buffer* de dados da memória FIFO.

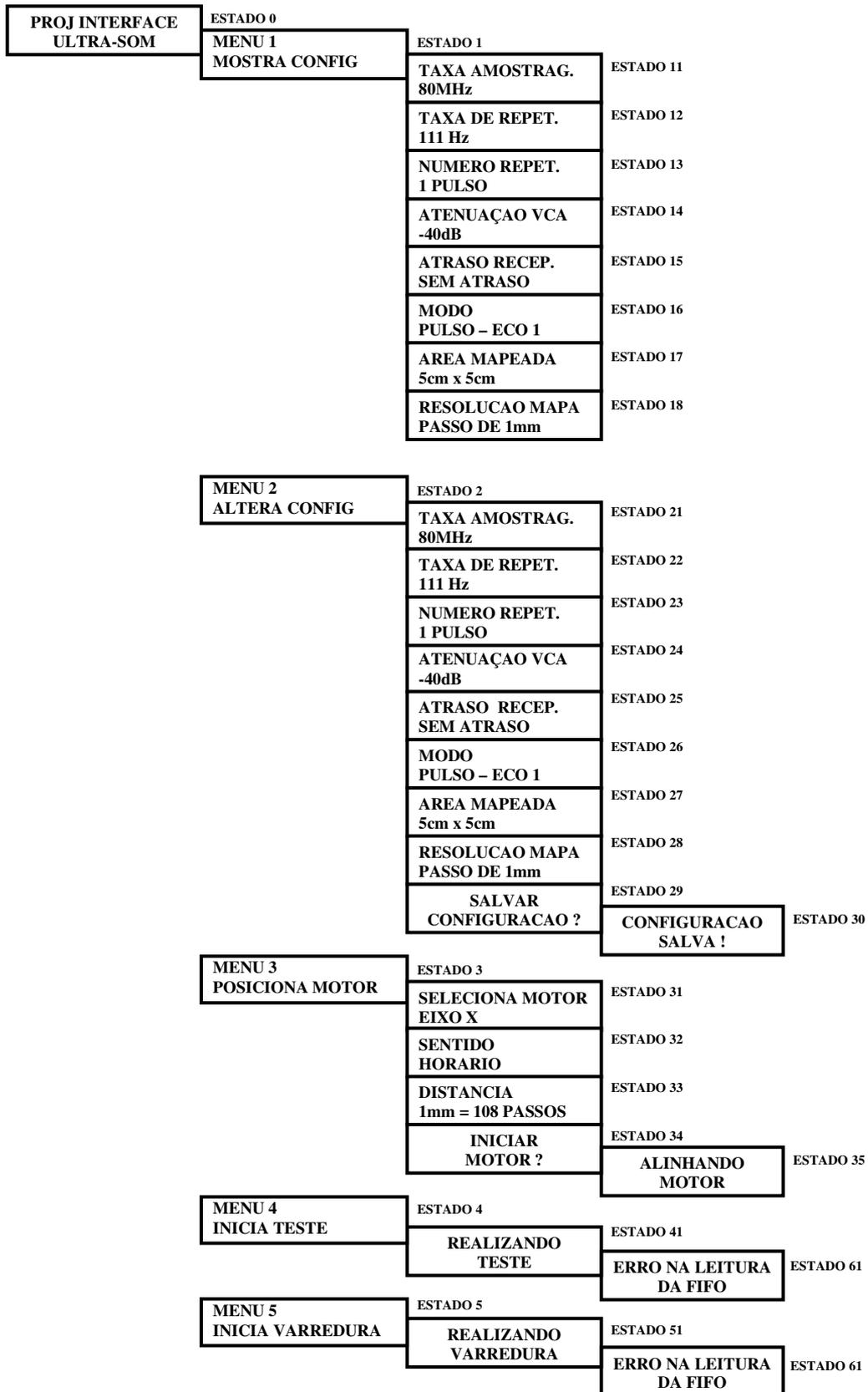


Figura 57 – Mensagens que podem ser apresentadas no LCD do sistema.

## 4.2 CARACTERIZAÇÃO DO *HARDWARE* DO SISTEMA

Para caracterizar o circuito amplificador da unidade de recepção, formado pelo amplificador com ganho controlado por tensão VCA810 em cascata com o amplificador diferencial THS4503, foi realizado o teste de resposta em frequência da unidade de recepção, com o resultado apresentado no gráfico da Figura 58. Os testes foram realizados utilizando-se um gerador de sinais de RF para aplicar um sinal senoidal na entrada do circuito amplificador de 100 mV de amplitude, para os ganhos de -20 dB, -10 dB, 0 dB, +10 dB e +20 dB, e 20 mV para o ganho de +30 dB, na faixa de frequência entre 100 kHz e 37,5 MHz, como condições de teste.

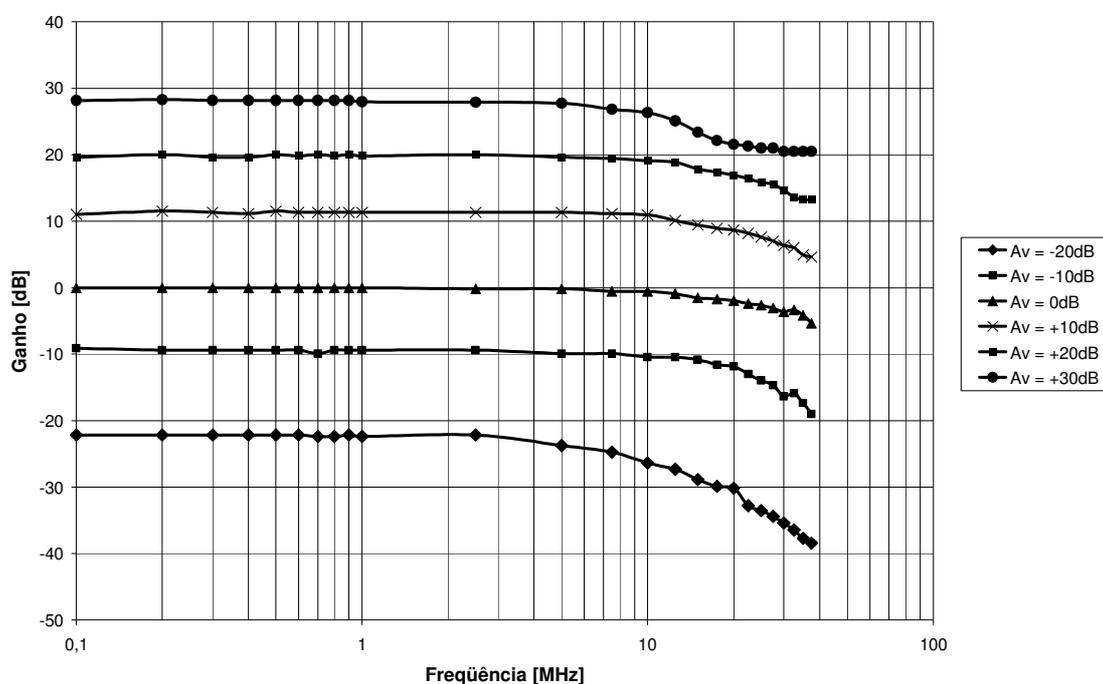


Figura 58 – Resposta em frequência da unidade de recepção do sistema.

A Figura 59 mostra a comparação entre os sinais de saída do primeiro circuito multivibrador monoestável no CH1 (canal 1 da tela do osciloscópio) e do conversor de nível lógico 7407 no CH2 (canal 2 da tela do osciloscópio), da unidade de transmissão do sistema de aquisição, após o pulso de disparo para a geração do pulso elétrico de alta amplitude. No CH1, o pulso de tensão aplicado à entrada do CI 7407, possui largura aproximada de 61 ns e amplitude máxima de 4,08 V, e no CH2, o sinal na saída do 7407, apresenta praticamente a mesma largura e amplitude máxima de 10 V.

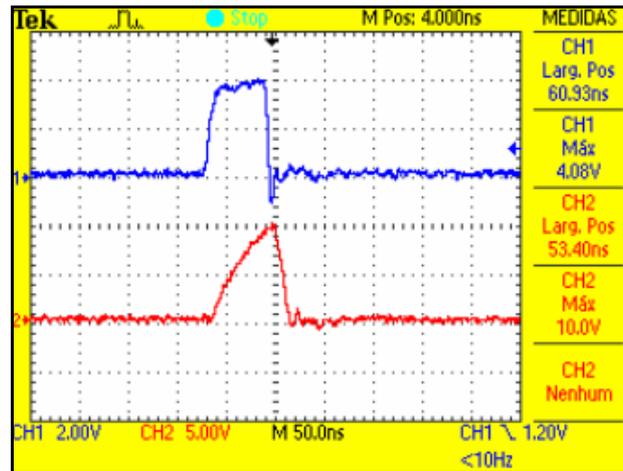


Figura 59 – Sinais de saída do primeiro multivibrador (CH1) e do conversor 7407 (CH2).

A Figura 60 apresenta o pulso de saída do primeiro circuito multivibrador (CH1) com base de tempo ampliada e largura de 61 ns, utilizado para disparar o segundo circuito multivibrador, gerando um sinal com largura aproximada de 4  $\mu$ s (CH2), na unidade de transmissão do sistema de aquisição.

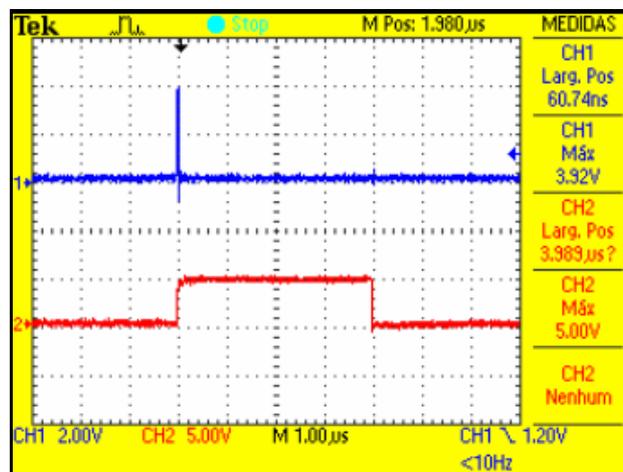


Figura 60 – Sinais de saída do primeiro (CH1) e segundo multivibrador monoestável (CH2).

Utilizando o sinal de saída do circuito multivibrador (CH1) como base de comparação, a Figura 61 apresenta o sinal gerado pelo circuito de corte na saída do multiplexador 74HC4052 (CH2) da unidade de recepção. Quando ocorre o disparo do multivibrador a tensão enviada para o pino de controle de ganho do circuito amplificador na recepção é aproximadamente 0 V, atenuando o sinal de saída do amplificador em 40 dB, evitando a reverberação do transdutor na recepção, que ocorre principalmente no modo pulso-eco.

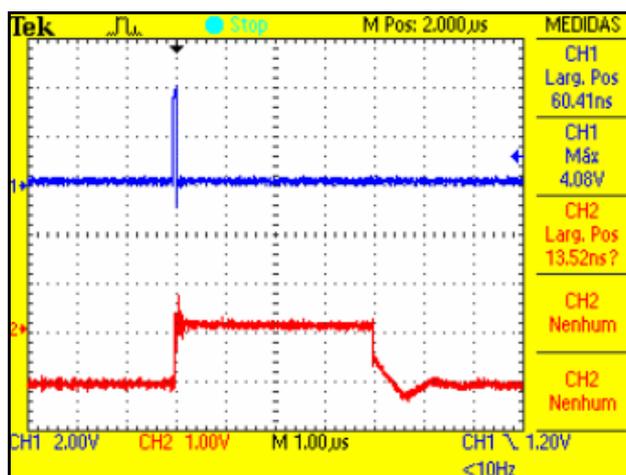


Figura 61 - Sinais de saída do primeiro circuito multivibrador (CH1) e multiplexador 74HC4052 (CH2) do circuito de corte.

A Figura 62 mostra um sinal senoidal de teste com amplitude 200 mV e frequência de 100 kHz (CH1) aplicado diretamente na entrada do circuito amplificador da unidade de recepção do sistema de aquisição. O ganho do circuito foi configurado para 0 dB (unitário), resultando, na saída do circuito amplificador, um sinal senoidal praticamente idêntico ao sinal aplicado, com amplitude de 208 mV (CH2).

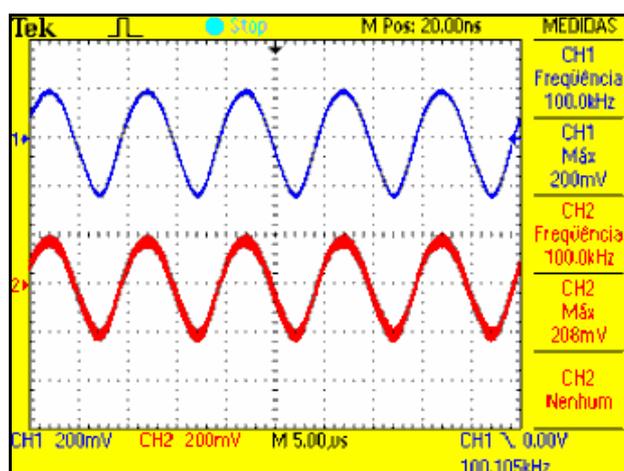


Figura 62 – Sinal de teste aplicado na entrada do circuito amplificador (CH1) e sinal de saída do circuito amplificador para ganho de 0 dB (CH2).

Com o mesmo sinal de teste aplicado à entrada do circuito de recepção, a Figura 63 apresenta os sinais de saída do amplificador diferencial com ganho unitário THS54503 (CH1 e CH2) da unidade de recepção. A tensão de modo comum, definida pelo conversor A/D, é de 1,8 V e as amplitudes máxima e mínima dos sinais são de 2,04 V e 1,6 V, respectivamente.

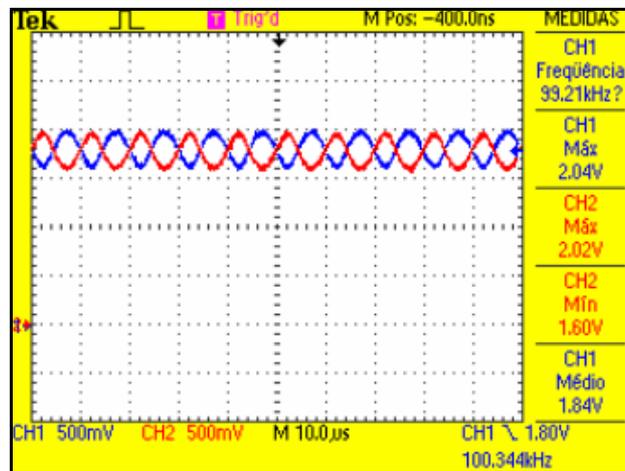


Figura 63 – Saídas do amplificador THS4503 com a aplicação de sinal de teste na entrada.

O CH1 da Figura 64 mostra o sinal na saída do primeiro circuito multivibrador que é utilizado para disparar o circuito de potência para geração do pulso elétrico de alta amplitude na unidade de transmissão, apresentado no CH2, com o transdutor desconectado do circuito. Esse pulso possui polaridade negativa com amplitude máxima de -210 V e largura aproximada de 98 ns.

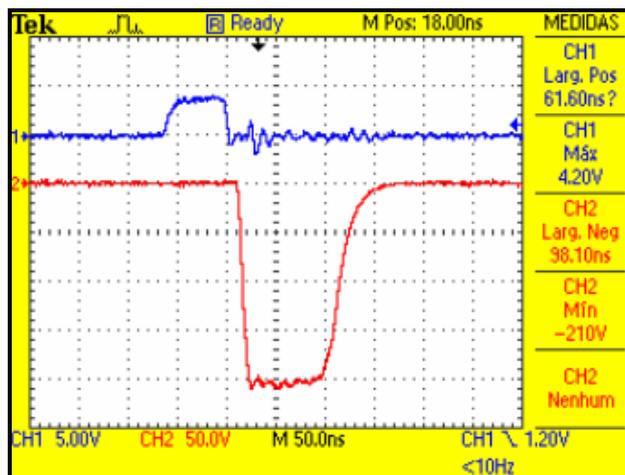


Figura 64 - Sinal de saída do primeiro circuito multivibrador (CH1) e pulso elétrico de alta amplitude gerado na unidade de transmissão (CH2).

### 4.3 ANÁLISE DE DESEMPENHO DO SISTEMA

As Figuras 65, 66(a) e 66(b) apresentam o sinal ultra-sônico captado pelo transdutor receptor, no modo transmissão-recepção, a uma distância de 3,2 cm. A Figura 65 mostra o sinal no conector do transdutor receptor obtido pelo osciloscópio. A Figura 66(a) mostra o sinal digitalizado pelo sistema de aquisição, enviado ao microcomputador e processado pelo *software* Matlab, sendo a Figura 66(b) a correspondente ampliação do sinal. O sistema foi configurado com ganho de +10 dB, sem atraso e frequência de amostragem de 5 MHz.

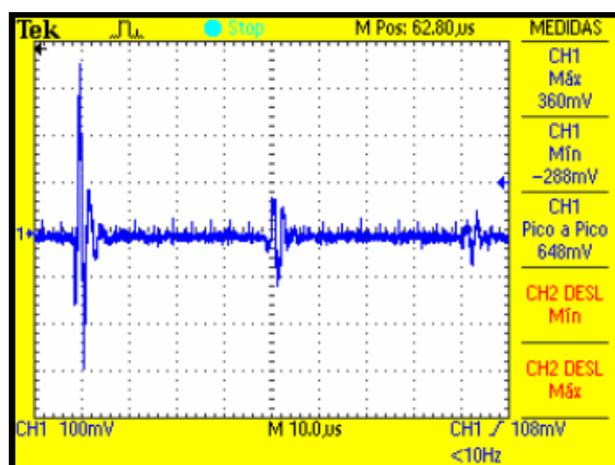


Figura 65 – Sinal ultra-sônico captado pelo osciloscópio no transdutor receptor no modo transmissão-recepção à uma distância de 3,2 cm.

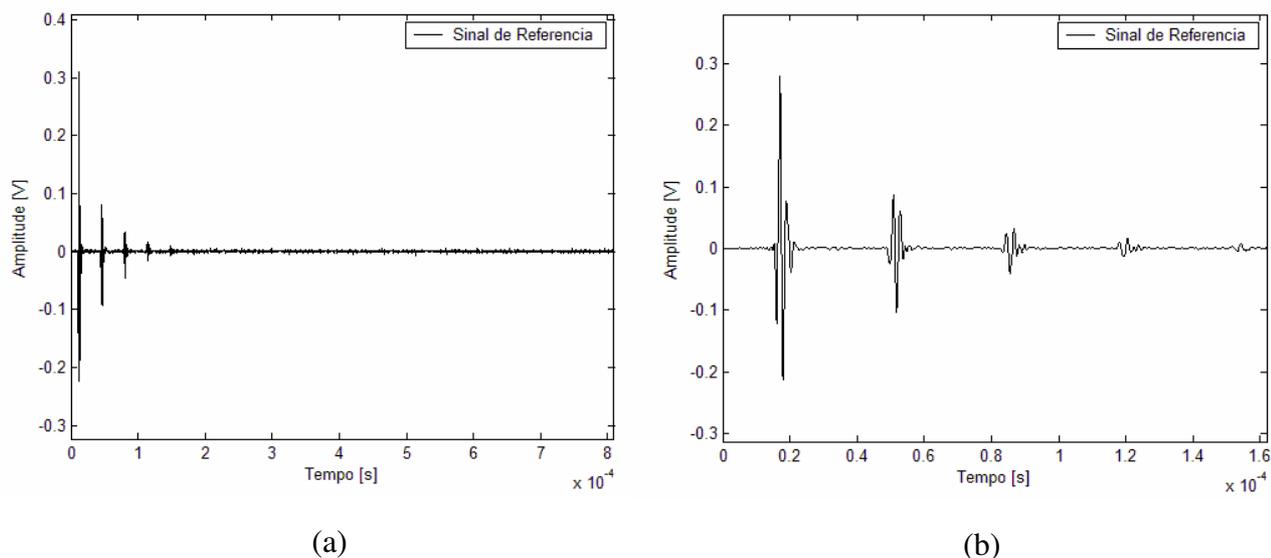


Figura 66 – (a) Sinal ultra-sônico digitalizado pelo sistema de aquisição; (b) ampliação do sinal anterior.

A Figura 67(a) mostra o sinal ultra-sônico de referência digitalizado pelo sistema e o envelope do mesmo, calculado através do valor absoluto da transformada de Hilbert, com o primeiro pico ampliado representado na Figura 67(b).

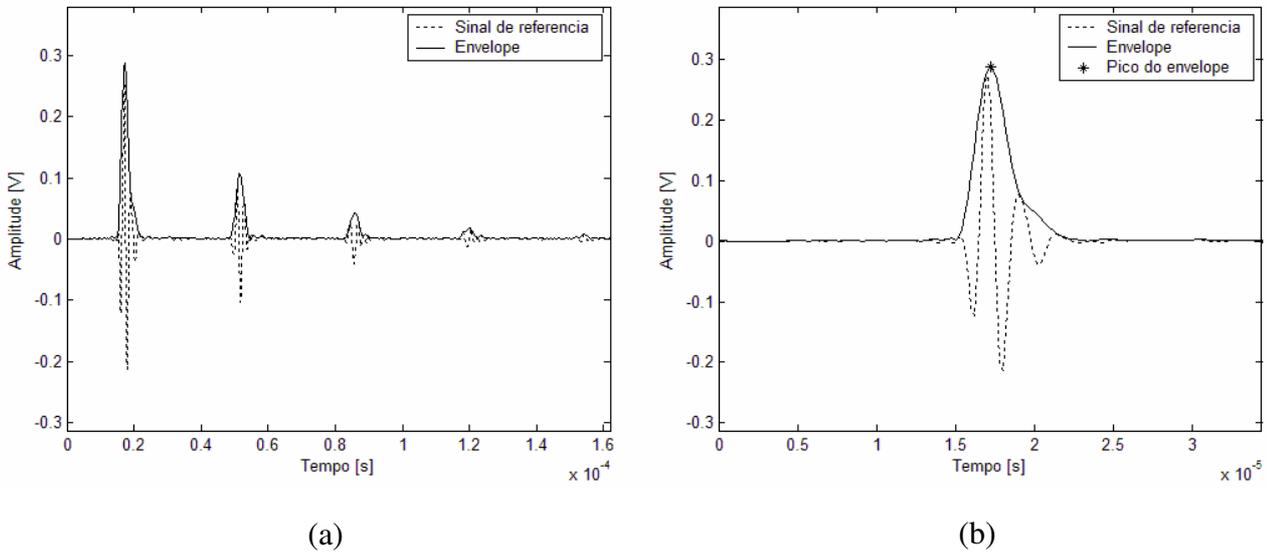


Figura 67 – (a) Sinal de referência e envelope do sinal; (b) ampliação do primeiro pico anterior.

As Figuras 68(a) e (b) apresentam o espectro de frequência do sinal digitalizado em volts (V) e em decibel (dB), respectivamente.

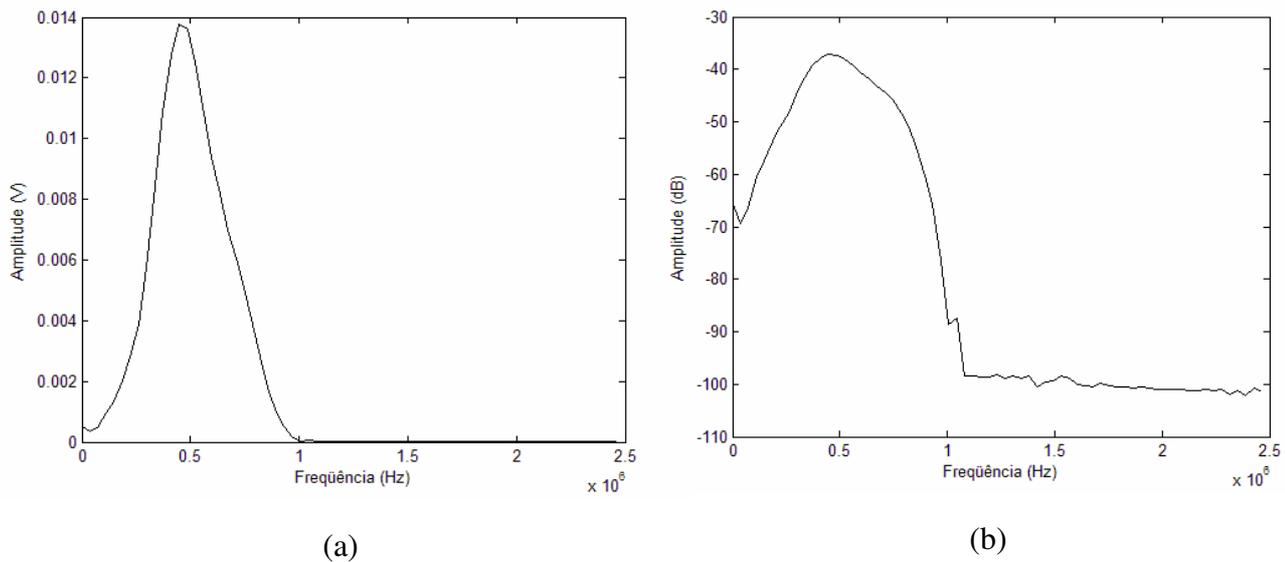


Figura 68 – Espectro de frequência do sinal digitalizado: (a) em volts (V); (b) em decibel (dB).

## 4.3.1 Resultados dos testes de velocidade

Para cada teste foram processadas 10 aquisições e verificados os valores máximo, mínimo, média e desvio padrão (D. P.) das velocidades calculadas. Além disso, são apresentados os erros percentuais do desvio padrão em relação aos valores médios e os valores médios totais das medidas. As Tabelas 29, 30 e 31 apresentam os resultados da velocidade de propagação da onda ultra-sônica para as distâncias de 2, 3,2 e 6 cm, respectivamente, no modo transmissão-recepção. A Tabela 31 mostra o resultado no leite como meio de propagação.

Tabela 29 – Velocidade de propagação da onda ultra-sônica (m/s) medida pelo método transmissão/recepção, com distância de 2 cm, na água a 26 °C.

<b>Medidas</b>	<b>5 MHz</b>	<b>10 MHz</b>	<b>20 MHz</b>	<b>40 MHz</b>	<b>80 MHz</b>
<b>Máximo</b>	1511,628	1520,468	1520,468	1513,828	1511,628
<b>Mínimo</b>	1511,628	1511,628	1516,035	1511,628	1508,339
<b>Média</b>	1511,628	1515,164	1516,478	1512,948	1510,202
<b>D. P. (±)</b>	0,000 (0,000 %)	4,565 (0,301 %)	1,402 (0,092 %)	1,136 (0,075 %)	1,161 (0,077 %)
<b>Média total ± D.P.</b>	1513,284 ± 3,162				

Tabela 30 - Velocidade de propagação da onda ultra-sônica (m/s) medida pelo método transmissão/recepção, com distância de 3,2 cm, na água a 26,5 °C.

<b>Medidas</b>	<b>5 MHz</b>	<b>10 MHz</b>	<b>20 MHz</b>	<b>40 MHz</b>	<b>80 MHz</b>
<b>Máximo</b>	1523,810	1516,588	1516,588	1514,793	1513,897
<b>Mínimo</b>	1509,434	1509,434	1513,002	1513,002	1511,216
<b>Média</b>	1510,872	1515,157	1515,871	1513,719	1512,466
<b>D. P. (±)</b>	4,546 (0,301 %)	3,016 (0,199 %)	1,512 (0,100 %)	0,925 (0,061 %)	0,863 (0,057 %)
<b>Média total ± D.P.</b>	1513,617 ± 3,084				

Tabela 31 – Velocidade de propagação da onda ultra-sônica (m/s) medida pelo método transmissão/recepção, com distância de 6 cm, no leite a 23 °C.

<b>Medidas</b>	<b>5 MHz</b>	<b>10 MHz</b>	<b>20 MHz</b>	<b>40 MHz</b>	<b>80 MHz</b>
<b>Máximo</b>	1492,891	1492,891	1492,891	1491,124	1494,991
<b>Mínimo</b>	1485,849	1489,362	1489,362	1490,242	1491,462
<b>Média</b>	1490,074	1490,420	1491,301	1490,331	1493,401
<b>D. P. (±)</b>	3,636 (0,244 %)	1,705 (0,114 %)	1,002 (0,067 %)	0,279 (0,019 %)	1,002 (0,067 %)
<b>Média total ± D.P.</b>	1491,106 ± 2,206				

As Tabelas 32, 33 e 34 apresentam os resultados da velocidade de propagação da onda para as distâncias de 2, 3,2 e 5 cm, nos materiais pedra pome, alumínio e acrílico, respectivamente, no modo transmissão-recepção.

Tabela 32 – Velocidade de propagação da onda ultra-sônica (m/s) medida pelo método transmissão/recepção, com distância de 2 cm, na pedra pome a 27 °C.

<b>Medidas</b>	<b>5 MHz</b>	<b>10 MHz</b>	<b>20 MHz</b>	<b>40 MHz</b>	<b>80 MHz</b>
<b>Máximo</b>	1397,849	1397,849	1401,617	1390,374	1486,776
<b>Mínimo</b>	1287,129	1274,510	1268,293	1260,606	1290,152
<b>Média</b>	1325,381	1314,803	1315,802	1319,860	1334,951
<b>D. P. (±)</b>	35,539 (2,681 %)	37,424 (2,846 %)	39,239 (2,982 %)	39,988 (3,030 %)	62,855 (4,708 %)
<b>Média total ± D.P.</b>	1322,159 ± 42,980				

Tabela 33 – Velocidade de propagação da onda ultra-sônica (m/s) medida pelo método transmissão/recepção, com distância de 3,2 cm, no alumínio a 26,5 °C.

<b>Medidas</b>	<b>5 MHz</b>	<b>10 MHz</b>	<b>20 MHz</b>	<b>40 MHz</b>	<b>80 MHz</b>
<b>Máximo</b>	5714,286	5675,676	5526,316	5586,458	5693,645
<b>Mínimo</b>	5517,241	5675,676	5490,196	5553,645	5610,000
<b>Média</b>	5694,581	5675,676	5522,704	5578,239	5628,239
<b>D. P. (±)</b>	62,311 (1,094 %)	0,000 (0,000 %)	11,422 (0,207 %)	11,613 (0,208 %)	24,255 (0,431 %)
<b>Média total ± D.P.</b>	5619,888 ± 70,281				

Tabela 34 – Velocidade de propagação da onda ultra-sônica (m/s) medida pelo método transmissão/recepção, com distância de 5 cm, no acrílico a 27 °C.

<b>Medidas</b>	<b>5 MHz</b>	<b>10 MHz</b>	<b>20 MHz</b>	<b>40 MHz</b>	<b>80 MHz</b>
<b>Máximo</b>	2683,673	2697,436	2690,537	2683,673	2681,963
<b>Mínimo</b>	2656,566	2683,673	2676,845	2676,845	2656,566
<b>Média</b>	2678,252	2686,426	2681,628	2677,869	2670,579
<b>D. P. (±)</b>	11,430 (0,427 %)	5,803 (0,216 %)	4,616 (0,172 %)	2,304 (0,086 %)	7,611 (0,285 %)
<b>Média total ± D.P.</b>	2678,951 ± 8,557				

As Tabelas 35 e 36 apresentam os resultados para as distâncias de 2 e 3,2 cm, respectivamente, no modo pulso-eco. A Tabela 37 mostra o resultado da velocidade de propagação da onda para a distância de 5 cm, no material acrílico.

Tabela 35 – Velocidade de propagação da onda ultra-sônica (m/s) medida pelo método pulso-eco, com distância de 2 cm, na água a 26 °C.

<b>Medidas</b>	<b>5 MHz</b>	<b>10 MHz</b>	<b>20 MHz</b>	<b>40 MHz</b>	<b>80 MHz</b>
<b>Máximo</b>	1514,793	1510,324	1508,100	1509,211	1510,324
<b>Mínimo</b>	1505,882	1505,882	1508,100	1508,100	1509,211
<b>Média</b>	1506,773	1509,436	1508,100	1508,545	1509,823
<b>D. P. (±)</b>	2,818 (0,187 %)	1,873 (0,124 %)	0,000 (0,000 %)	0,574 (0,038 %)	0,316 (0,021 %)
<b>Média total ± D.P.</b>	1508,536 ± 1,832				

Tabela 36 – Velocidade de propagação da onda ultra-sônica (m/s) medida pelo método pulso-eco, com distância de 3,2 cm, na água a 26 °C.

<b>Medidas</b>	<b>5 MHz</b>	<b>10 MHz</b>	<b>20 MHz</b>	<b>40 MHz</b>	<b>80 MHz</b>
<b>Máximo</b>	1511,962	1511,962	1508,353	1508,353	1507,903
<b>Mínimo</b>	1504,762	1504,762	1506,555	1506,555	1507,004
<b>Média</b>	1506,202	1508,357	1507,095	1507,095	1507,454
<b>D. P. (±)</b>	3,036 (0,202 %)	2,400 (0,159 %)	0,868 (0,058 %)	0,628 (0,042 %)	0,300 (0,020 %)
<b>Média total ± D.P.</b>	1507,240 ± 1,803				

Tabela 37 – Velocidade de propagação da onda ultra-sônica (m/s) medida pelo método pulso-eco, com distância de 5 cm, no acrílico a 21°C.

<b>Medidas</b>	<b>5 MHz</b>	<b>10 MHz</b>	<b>20 MHz</b>	<b>40 MHz</b>
<b>Máximo</b>	2702,703	2695,418	2695,418	2693,603
<b>Mínimo</b>	2688,172	2688,172	2691,790	2689,980
<b>Média</b>	2693,984	2694,693	2692,878	2691,972
<b>D. P. (±)</b>	7,504 (0,279 %)	2,291 (0,085 %)	1,752 (0,065 %)	1,337 (0,050 %)
<b>Média total ± D.P.</b>	2693,382 ± 4,054			

## 4.3.2 Resultados dos testes de atenuação

Os valores de atenuação foram calculados considerando os 2 primeiros pulsos. As Tabelas 38 e 39 apresentam os resultados para as distâncias de 2 e 3,2 cm, respectivamente, no modo transmissão-recepção, e as Tabelas 40 e 41 no modo pulso-eco.

Tabela 38 – Atenuação da onda ultra-sônica (dB/cm) medida pelo método transmissão/recepção, com distância de 2 cm, na água a 26 °C.

<b>Medidas</b>	<b>5 MHz</b>	<b>10 MHz</b>	<b>20 MHz</b>	<b>40 MHz</b>
<b>Máximo</b>	-1,645	-1,630	-1,583	-1,545
<b>Mínimo</b>	-1,687	-1,659	-1,626	-1,581
<b>Média</b>	-1,661	-1,645	-1,608	-1,567
<b>D. P. (±)</b>	0,015 (0,909 %)	0,011 (0,684 %)	0,012 (0,729 %)	0,012 (0,764 %)
<b>Média total ± D.P.</b>	-1,621 ± 0,039			

Tabela 39 – Atenuação da onda ultra-sônica (dB/cm) medida pelo método transmissão/recepção, com distância de 3,2 cm, na água a 26,5 °C.

<b>Medidas</b>	<b>5 MHz</b>	<b>10 MHz</b>	<b>20 MHz</b>	<b>40 MHz</b>
<b>Máximo</b>	-1,347	-1,338	-1,303	-1,280
<b>Mínimo</b>	-1,381	-1,354	-1,330	-1,312
<b>Média</b>	-1,368	-1,346	-1,317	-1,297
<b>D. P. (±)</b>	0,012 (0,880 %)	0,005 (0,367 %)	0,009 (0,680 %)	0,012 (0,914 %)
<b>Média total ± D.P.</b>	-1,332 ± 0,029			

Tabela 40 – Atenuação da onda ultra-sônica (dB/cm) medida pelo método pulso-eco, com distância de 2 cm, na água a 26 °C.

<b>Medidas</b>	<b>5 MHz</b>	<b>10 MHz</b>	<b>20 MHz</b>	<b>40 MHz</b>
<b>Máximo</b>	-1,448	-1,423	-1,423	-1,439
<b>Mínimo</b>	-1,535	-1,493	-1,493	-1,493
<b>Média</b>	-1,483	-1,447	-1,447	-1,462
<b>D. P. (±)</b>	0,030 (2,042 %)	0,020 (1,399 %)	0,020 (1,399 %)	0,019 (1,303 %)
<b>Média total ± D.P.</b>	-1,460 ± 0,027			

Tabela 41 – Atenuação da onda ultra-sônica (dB/cm) medida pelo método pulso-eco, com distância de 3,2 cm, na água a 26 °C.

<b>Medidas</b>	<b>5 MHz</b>	<b>10 MHz</b>	<b>20 MHz</b>	<b>40 MHz</b>
<b>Máximo</b>	-1,267	-1,288	-1,284	-1,300
<b>Mínimo</b>	-1,375	-1,366	-1,349	-1,354
<b>Média</b>	-1,324	-1,316	-1,303	-1,327
<b>D. P. (±)</b>	0,040 (3,025 %)	0,021 (1,598 %)	0,019 (1,467 %)	0,018 (1,356 %)
<b>Média total ± D.P.</b>	-1,317 ± 0,027			

#### 4.3.3 Resultados dos testes de atenuação em banda larga (BUA)

A Figura 69(a) mostra a comparação entre dois sinais ultra-sônicos com velocidades e atenuações diferentes medidos utilizando a técnica de transmissão-recepção para a distância de 5 cm. O sinal contínuo é o sinal de referência na água e o tracejado é obtido após a propagação do ultra-som através do acrílico. A Figura 69(b) apresenta o espectro de frequência como resultado do processamento da Transformada Rápida de Fourier (FFT) dos dois sinais para a mesma faixa de frequência.

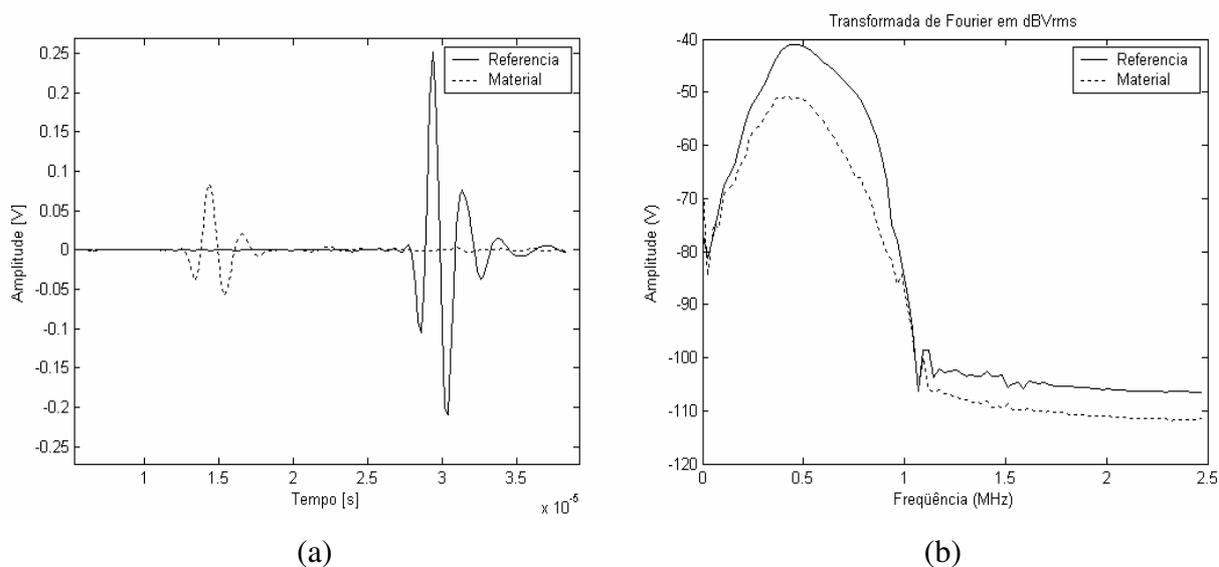


Figura 69 – (a) Sinal de referência (contínuo) e sinal transmitido através do acrílico (tracejado); (b) espectro de freqüência do sinal de referência (contínuo) e do sinal que se propagou através do material (tracejado).

A Figura 70(a) apresenta a curva de atenuação em função da freqüência, processada através da subtração dos valores absolutos das FFTs do sinal de referência e do sinal no material, e também a reta que melhor se ajusta aos pontos desta curva na faixa entre 0,2 MHz e 0,7 MHz. A Figura 70(b) mostra os resultados das 10 aquisições para cálculo do coeficiente de atenuação em banda larga (BUA), obtido através da inclinação da reta de regressão da Figura 70(a), especificado em dB/MHz.

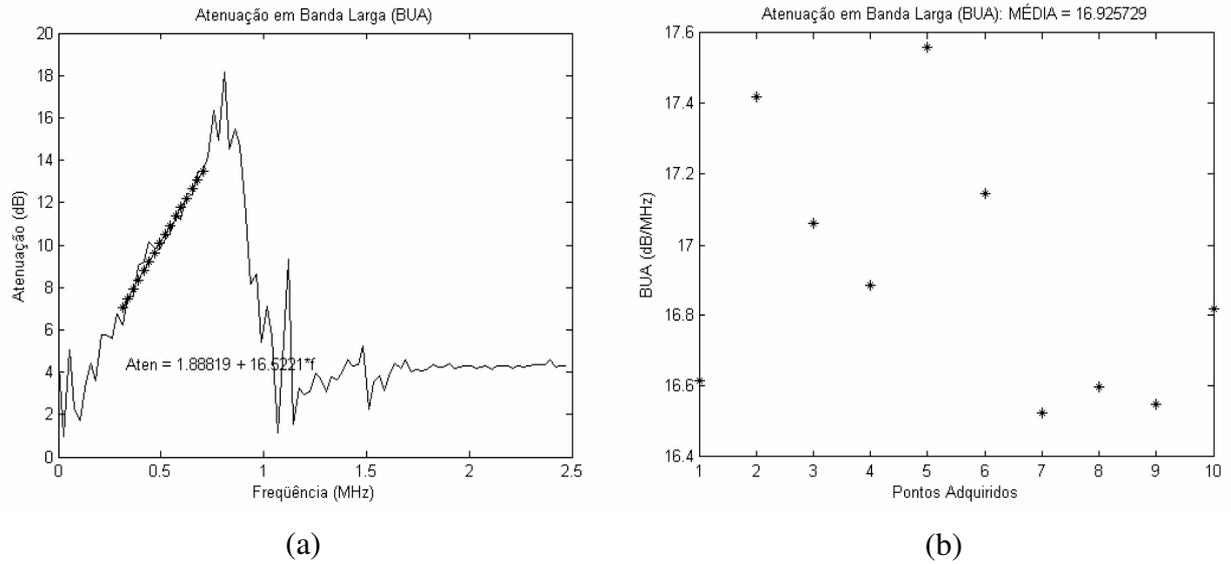


Figura 70 – (a) Curva de atenuação em função da frequência; (b) resultados e média das 10 aquisições para cálculo do BUA.

A Tabela 42 apresenta o resultado do BUA obtido através do processamento das 10 aquisições para três frequências de amostragem do sistema de aquisição.

Tabela 42 – Resultado do cálculo do BUA no acrílico (dB/MHz).

Medidas	5 MHz	10 MHz	20 MHz
<b>Máximo</b>	17,591	17,131	17,561
<b>Mínimo</b>	16,376	16,309	16,525
<b>Média</b>	16,931	16,797	16,918
<b>D. P. (<math>\pm</math>)</b>	0,449 (2,651 %)	0,293 (1,745 %)	0,370 (2,185 %)
<b>Média total <math>\pm</math> D.P.</b>	16,882 $\pm$ 0,368		

## 5 DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

Este capítulo apresenta a discussão dos resultados obtidos neste trabalho, inclusive comparando-os com os resultados de outros trabalhos relacionados. Apresentam-se, também as conclusões e sugestões de possíveis trabalhos que poderão dar seqüência a esta pesquisa.

### 5.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os testes realizados com o protótipo do sistema de aquisição e processamento de sinais de ultra-som mostram que a unidade de recepção possui faixa de resposta em frequência de 20 kHz a 20 MHz, limitada pelas características dos componentes utilizados, porém adequada ao uso dos transdutores de 500 kHz a 5 MHz. O circuito de corte, fundamental para que se elimine a reverberação produzida logo após a excitação do transdutor, apresentou tempo de corte de 4  $\mu$ s, fazendo com que a unidade de recepção receba apenas os sinais que são realmente relevantes às pesquisas.

A Figura 64 do capítulo anterior mostra que os circuitos da unidade de transmissão possibilitam a geração de pulsos elétricos de alta amplitude com polaridade negativa, em torno de -210 V, e largura aproximada de 100 ns. Este tempo é importante, pois para uma maior transferência de energia ao transdutor, é necessário um aumento da amplitude e largura do pulso, mas para um maior rendimento a largura do pulso não deve ser maior que metade do comprimento da onda ( $\lambda/2$ ) da frequência fundamental da onda ultra-sônica gerada pelos transdutores (WELL, 1977).

Os resultados apresentados no capítulo anterior mostram que existe pouca variação de valores para a unidade de recepção, do sistema de aquisição, operando com taxa de digitalização nas frequências de 5, 10, 20, 40 e 80 MHz. Além disso, a comparação entre as formas de onda obtidas pelo osciloscópio e pelo sistema mostra que a unidade de recepção, representada principalmente pelo conversor A/D ADS5410, apresentou funcionamento correto, resultando no espectro de frequência, a partir do cálculo do FFT, com valor máximo centralizado na frequência fundamental do transdutor de 500 kHz.

A análise estatística dos resultados obtidos demonstra que as velocidades médias de propagação do som na água para os métodos transmissão-recepção e pulso-eco são de aproximadamente 1513 m/s e 1507 m/s, respectivamente. Esta diferença se deve

principalmente à diferença na distância de posicionamento e alinhamento dos transdutores, conforme descrito nos trabalhos de GIESEY, STEMM e ROTH (1990). Por exemplo, para um teste com os transdutores posicionados a 2 cm, um erro de posicionamento de 1 mm equivale a um erro de 70 m/s para mais ou menos no cálculo da velocidade. Na literatura são encontrados diferentes valores para a velocidade de propagação do som na água. No estudo de WELLS (1977) a velocidade de propagação do som na água é de 1480 m/s e segundo BRONZINO (1986) a velocidade é de 1520 m/s. Porém estes estudos apresentam os resultados para água degaseificada e deionizada, enquanto para os testes realizados foi utilizada água do sistema de abastecimento sem tratamento especial.

Pela análise dos resultados obtidos, as velocidades médias de propagação nos diferentes meios utilizados, como o leite, acrílico, alumínio e pedra pome (pedra sabão), são de 1491 m/s, 2679 m/s, 5620 m/s e 1322 m/s, respectivamente. Destes valores, somente o alumínio foi encontrado na literatura, sendo especificado em 6300 m/s (WELLS, 1977), resultando em um erro de 10,79 %. Após comparação do sinal no osciloscópio foi verificado que o valor calculado pelo sistema estava correto, resultando na conclusão que o material de alumínio utilizado no teste não era puro ou de mesma composição do material utilizado por WELLS (1977).

Os resultados obtidos mostram que os valores médios da atenuação do sinal ultrassônico na água para os métodos transmissão-recepção e pulso-eco são de 1,476 dB/cm e 1,389 dB/cm, resultando em erro de aproximadamente 6 %. Calculando estes valores na relação direta entre as amplitudes do segundo pico do sinal de eco e o primeiro pico, os resultados são de 0,844 V/V e 0,852 V/V, correspondendo ao erro real do sistema que é menor que 1 %. Os valores de atenuação apresentaram uma variação maior para distâncias diferentes, pois neste processamento não foi utilizada a técnica do envelope e sim a leitura dos picos dos sinais ultrassônicos, para tentar evitar alteração na amplitude dos sinais, resultante do processamento realizado pela transformada de Hilbert. Com isso, os ruídos oriundos principalmente do chaveamento do circuito de amostragem contribuíram para o erro da leitura dos valores de pico dos sinais. Uma forma de diminuir estes erros é a implementação de filtros digitais mais eficazes, capazes de eliminar somente os ruídos de modo comum e do chaveamento de alta frequência, e não alterar a amplitude do sinal real.

Os resultados mostram ainda a relação da atenuação em função da frequência tendo como meio de referência a água e como material de teste o alumínio. Realizando o procedimento descrito por LANGTON, PALMER e PORTER (1984), foram obtidas as curvas de atenuação em função da frequência e verificada a área de cada curva onde existe

uma relação aproximadamente linear, na faixa entre 0,3 MHz e 0,7 MHz. Processando cada curva foi obtido o coeficiente angular da regressão que corresponde ao índice de atenuação em banda larga (BUA), resultando no correspondente valor médio do BUA para o acrílico igual a 16,88 dB/MHz, com erro inferior a 5 % entre as medidas.

## 5.2 CONCLUSÕES

Pode-se considerar que o objetivo deste trabalho, que foi o de projetar e construir um sistema de aquisição e processamento de sinais de ultra-som para caracterização de meios biológicos e não biológicos, bastante confiável, compacto e com inovação tecnológica, foi atingido.

Todas as características definidas na especificação de requisitos de sinalização e configurações, como controle de ganho, modo de operação, frequência de amostragem, etc., foram implementadas e apresentam funcionalidade correta.

A maior contribuição do presente trabalho de pesquisa é a disponibilização de um sistema de ultra-som adequado e viável, que poderá ser utilizado para auxílio no desenvolvimento de pesquisas na área de ultra-som tais como instrumentação eletrônica, construção e caracterização de transdutores piezoelétricos, mapeamento de campos acústicos, estudo da geração, propagação e detecção de ondas ultra-sônicas, testes não-destrutivos de materiais e sua interação com tecidos e líquidos biológicos. Além disso, na área médica o sistema poderá ser utilizado nas pesquisas do ultra-som terapêutico e do auxílio ao diagnóstico de doenças de forma não-invasiva e não-ionizante.

Os resultados obtidos em *vitro* são compatíveis com os resultados em *vivo*, sendo que as curvas obtidas no processamento para cálculo do BUA são semelhantes às obtidas nos artigos pesquisados. Isto indica que o sistema é válido para dar continuação ao trabalho desenvolvido por MAIA (2001) para auxílio ao diagnóstico da osteoporose por ultra-som.

## 5.3 TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para dar continuidade a este trabalho, pode-se citar montagem e alojamento do sistema em um bastidor de plástico com aberturas para as chaves, *display* de cristal líquido, conectores dos transdutores, conector de comunicação USB e fontes de

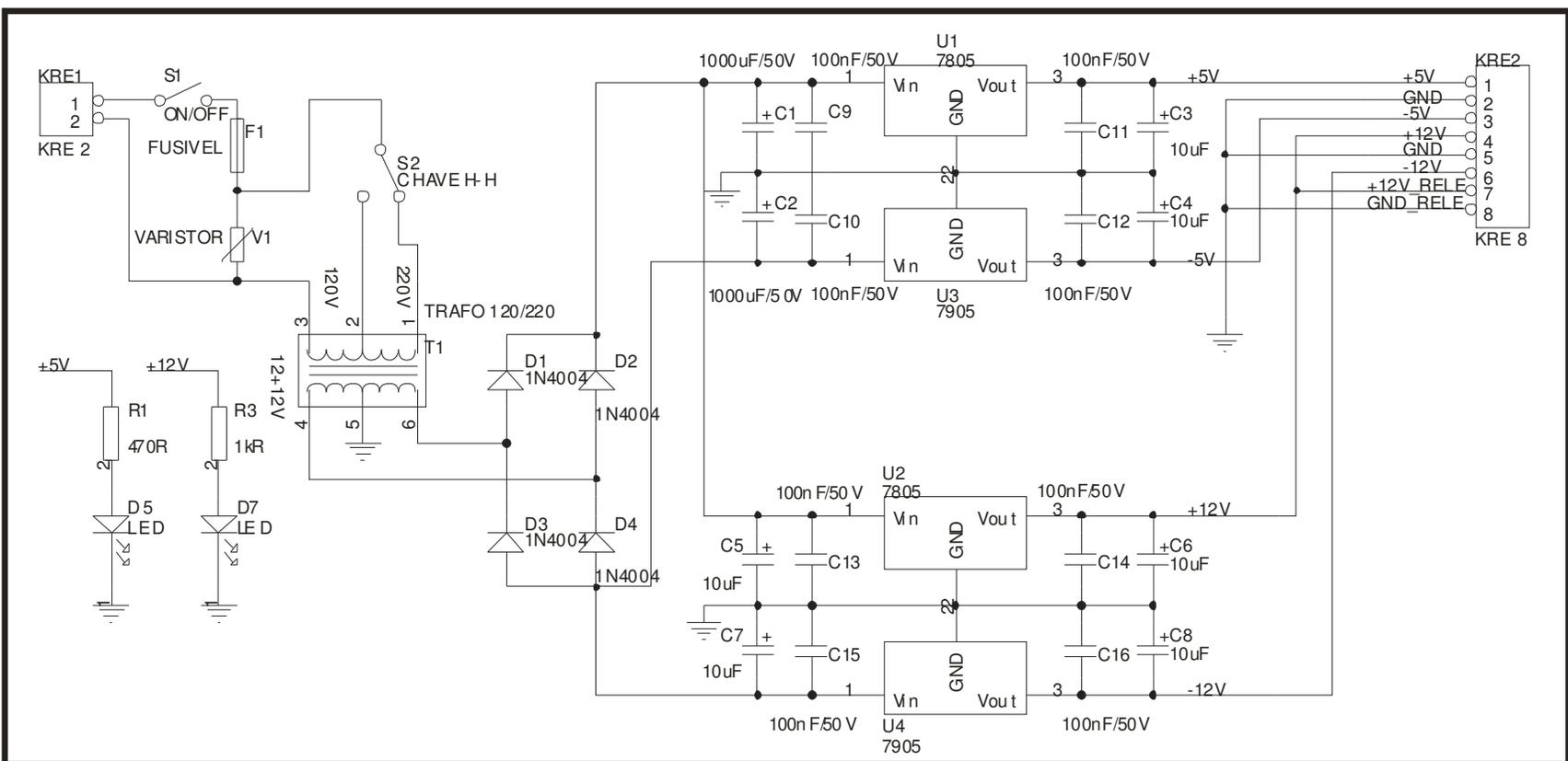
alimentação. Após esta correção, o equipamento poderá ser submetido ao comitê de ética para permitir a realização de testes em pacientes, para medição do BUA nos ossos de regiões periféricas (geralmente calcâneo e região distal do antebraço), possibilitando a utilização deste no auxílio do diagnóstico da osteoporose. Além disso, devem ser estudadas melhorias tecnológicas para o sistema, como por exemplo:

- Desenvolvimento da placa Interface\_V2, incorporando o circuito do DSP, as interfaces de comunicação serial USB e RS232, e os *driver* para motor de passo, tornando o sistema mais compacto e confiável, diminuindo o custo do projeto;
- Montagem dos circuitos das fontes de baixa e alta tensão em uma única placa de circuito impresso em dupla face e com tecnologia SMD, fazendo que o tamanho físico do sistema seja reduzido;
- Implementação de um dispositivo de armazenamento de dados em bloco, como por exemplo, desenvolvimento de um *driver* para HD (*hard disk*), *driver* para disquete, cartões de memória *flash* ou *open drive*, para permitir que o DSP realize todo o processamento independente de um computador, melhorando a portabilidade do sistema.

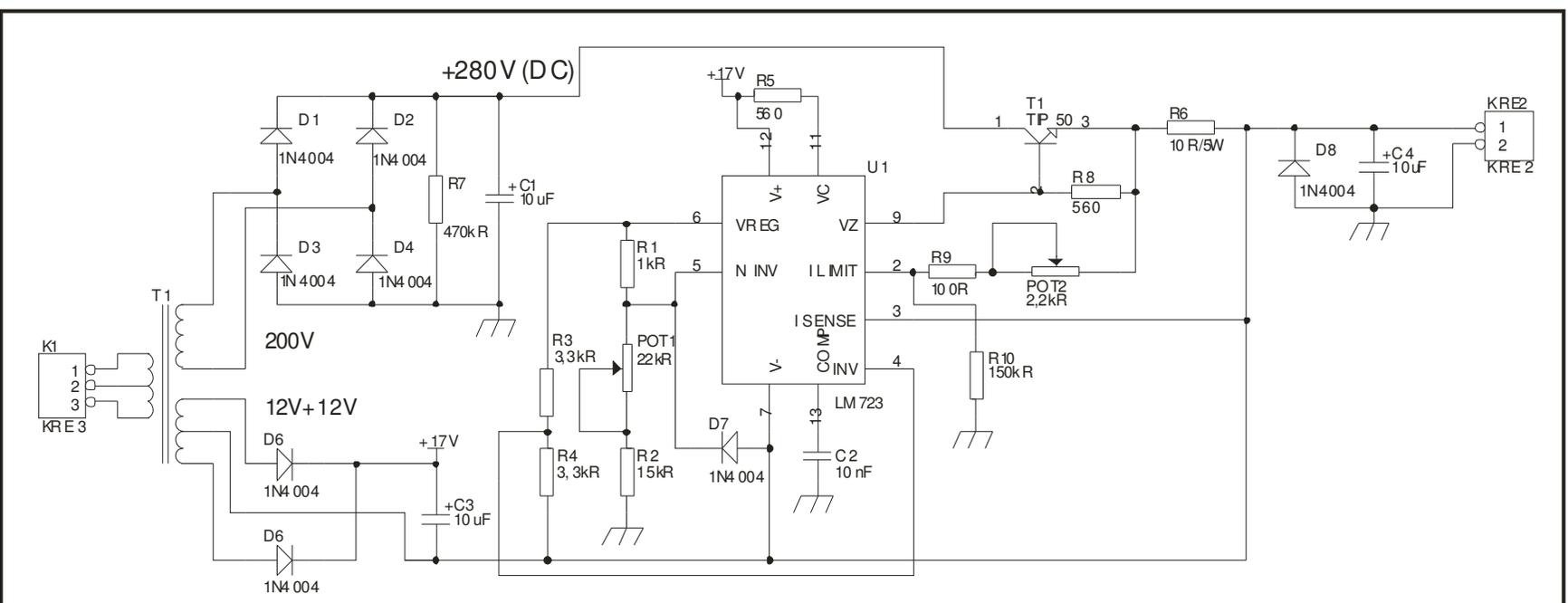
## **APÊNDICE A – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DA PLACA INTERFACE\_V1**

O diagrama esquemático completo da placa Interface\_V1 é apresentado na próxima folha em formato A3 para melhor visualização dos componentes.





APÊNDICE B – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DA PLACA FONTE\_V1



APÊNDICE C – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DA PLACA DE +200V

## APÊNDICE D – PROGRAMAÇÃO DO *SOFTWARE* MATLAB PARA O PROCESSAMENTO E ANÁLISE DO BUA

```

function [freq_amost] = ultra3(modos);           % O modo 0 apresenta o sinal completo
                                                % O modo 1 apresenta o sinal sem o inicio,
                                                % que representa o corte do amplificador (4us)

%echo on;
clear;
clc;                                           % limpa tela
% Este programa le um buffer de entrada no formato txt e calcula a FFT do sinal digitalizado pelo ADC5410.
% A relacao do ADC 5410 e a seguinte:
% +0.5V = 2047 pesos (011111111111)
% -0.5V = 2048 pesos (100000000000)
echo off
disp('Le o Nome do Arquivo de Dados');
% Le o nome do arquivo de dados com extensao .TXT
[nomearq,n] = uigetfile('*.*txt','Abrir',107,232);
if (nomearq == 0)
    clear;
    return;
end

index=1;
% Carrega o arquivo de dados na variavel nome para ser processado
buffer = load(nomearq);

% A primeira posicao do buffer contem a frequencia de amostragem
% Deve-se multiplicar por 1e6 para obter o valor real em MHz
freq=buffer(1,1);
freq_amost=buffer(1,1)*1e6;

% A segunda posicao do buffer contem a atenuacao do VCA810 conforme a tabela a seguir:
% 0=-40dB, 1=-30dB, 2=-20dB, 3=-10dB, 4=0dB, 5=10dB, 6=20dB, 7=30dB, 8=40dB
atenuacao=buffer(2,1);

% A terceira posicao do buffer contem o tempo de atraso para habilitacao da FIFO em us.
atraso=buffer(3,1);

%Retira os primeiros 10us para eliminar o sinal de corte do amplificador
inicio_sinal=70;
%inicio_sinal=10;
atraso_filtro=30;
div_freq = 2.5;
div_freq_atenua = 50e3;

if freq == 5
    inicio_buf=70;
    escala_f=2;
elseif freq == 10
    inicio_buf=100;
    inicio_sinal=inicio_sinal*2;
    div_freq = 2*div_freq;
    div_freq_atenua = 2*div_freq_atenua;
    escala_f=4;
    atraso_filtro=atraso_filtro*2;
elseif freq == 20
    inicio_buf=200;
    inicio_sinal=inicio_sinal*4;
    div_freq = 4*div_freq;
    div_freq_atenua = 4*div_freq_atenua;
    escala_f=8;
    atraso_filtro=atraso_filtro*4;
elseif freq == 40
    inicio_buf=400;
    inicio_sinal=inicio_sinal*8;
    div_freq = 8*div_freq;
    div_freq_atenua = 8*div_freq_atenua;
    escala_f=16;
    atraso_filtro=atraso_filtro*8;
else
    inicio_buf=800;
    inicio_sinal=inicio_sinal*16;

```

```

div_freq = 16*div_freq;
div_freq_atenua = 16*div_freq_atenua;
escala_f=32;
atraso_filtro=atraso_filtro*16;
end

size_buffer=1024;
y=buffer(inicio_buf:size_buffer,1);           % retirado os primeiros 10us
x=y';                                         % converte o buffer para formato transposto
N=max(size(x));                              % N = numero de words do buffer
n=0:N-1;                                     % escala de pontos do buffer
t=n/freq_amost;                              % escala de tempo

% Conversao do valor digital (peso) para o valor em volts
x = (x-2047)*0.5/2047;

plot(t,x,'k-'),title('Sinal de Referencia s/ filtro'),
ylabel('Amplitude [V]'),xlabel('Tempo [s]');
pause;
close;
%return;

pico=0;
for i=1: 1: N-1,
    if pico < x(1,i)
        pico = x(1,i);                       % verifica a maior amplitude do sinal
        posicao = t(1,i);                     % grava a posicao na escala do tempo da amplitude
        apontador=i;                         % grava a posicao do vetor tempo
    end
end

sinal_ref=x(1,1:apontador+inicio_sinal);
N=max(size(sinal_ref));                      % N = numero de words do buffer
n=0:N-1;                                    % escala de pontos do buffer
t=n/freq_amost;                             % escala de tempo

n_coeficientes=50;
W=[freq_amost/div_freq];
[B,A]=fir1(n_coeficientes,W/(freq_amost));
sinal_ref=filter(B,A,sinal_ref);

plot(t,sinal_ref,'k-'),title('Sinal de Referencia c/ filtro'),
ylabel('Amplitude [V]'),xlabel('Tempo [s]');
pause;
close;

X=fft(sinal_ref);
f=n*freq_amost/(N-1);

% Determina a escala de frequência, eliminando a parte simétrica
f=freq_amost*(0:(N-2)/2)/N;

% Armazena a transformada de Fourier do sinal de referência em VR
% O sinal de referência vem do suporte livre (propagação na água)
VR = X;
vr = sinal_ref;

% Abre arquivo para armazenar resultados da analise
[fres,message] = fopen('resultado.txt','wt');

% *****
% * Atuliza o conteudo do buffer para leitura do sinal a ser comparado *
% *****
while max(size(buffer))>1030,

buffer=buffer(size_buffer+1:max(size(buffer),1); % retirado os primeiros 10us
y=buffer(inicio_buf:size_buffer,1);           % retirado os primeiros 10us
x=y';                                         % converte o buffer para formato transposto
N=max(size(x));                              % N = numero de words do buffer
n=0:N-1;                                     % escala de pontos do buffer
t=n/freq_amost;                              % escala de tempo

% Conversao do valor digital (peso) para o valor em volts
x = (x-2047)*0.5/2047;

W=[freq_amost/div_freq];

```

```

[B,A]=fir1(n_coeficientes,W/(freq_amostr)); %
x=filter(B,A,x);

pico=0;
for i=1: 1: N-1,
    if pico < x(1,i)
        pico = x(1,i);
        posicao = t(1,i);
        indice=i;
    end
end

%Amostra totalmente atenuada para eliminar os ecos
W=[freq_amostr/div_freq_atenua];
[B,A]=fir1(40,W/(freq_amostr));
filtro=filter(B,A,x);

sinal_am=x(1,inicio_sinal:apontador+inicio_sinal);
sinal_am=x(1,1:apontador+inicio_sinal);
N=max(size(sinal_am));
n=1:N;
t=n/freq_amostr;

% N = numero de words do buffer
% escala de pontos do buffer 140 (70+70)
% escala de tempo

plot(t,sinal_ref,'k-');
hold on;

plot(t,sinal_am,'k');
ylabel('Amplitude [V]'),xlabel('Tempo [s]');
legend('Referencia','Material');
pause;
close;

Y=fft(sinal_am);
f=n*freq_amostr/(N-1);

% Determina a escala de frequência, eliminando a parte simétrica
% f = frequência de amostragem do sinal
f=freq_amostr*(0:(N-2)/2)/N;
f = f/1e6; % Escala em MHz

% Plota o valor absoluto da FFT na base logaritimica
plot(f(1:N/escala_f),20*log10(abs(X(1:(N/escala_f))/N)),k-'), title('Transformada de Fourier em dBVrms'), ...
xlabel('Frequência (MHz)');
ylabel('Amplitude (V)');
hold on;

% Plota o valor absoluto da FFT na base logaritimica
plot(f(1:N/escala_f),20*log10(abs(Y(1:(N/escala_f))/N)),k-'), title('Transformada de Fourier em dBVrms'), ...
legend('Referencia','Material');
disp('Valor Absoluto da Transformada de Fourier');
disp('Aperte qualquer tecla para continuar. ');
pause;
close;

% Armazena a transformada de Fourier do Sinal a ser comparado em VS
% O sinal vem do suporte com o pé, alumínio ou acrílico
VS = Y;
ys = sinal_am;

% Determina os valores em dB de VR e de VS
VRdB = 20*log10(abs(VR));
VSdB = 20*log10(abs(VS));

d=1;%distancia entre os transdutores
% Determina a atenuação específica da amostra
%aten = 20*log10(abs(VR) - abs(VS))/d;
aten = abs(VRdB - VSdB)/d;

% Plota Zoom da Atenuação Específica na Faixa de Linearidade
% Se o transdutor for de 0,5 MHz, Faixa = 0,3 - 0,7
% Se o transdutor for de 1,0 MHz, Faixa = 0,8 - 1,2
[Ampl,indice] = max(abs(VR))

if indice > 20
    indice = 20;

```

```

end
%nx1 = 5; nx2 = 30;
nx1 = 12; nx2 = 25; % equivale a 0,3MHz e 0,7MHz
% Transdutor de 0,5 MHz
if (f(indice) > 0.4) & (f(indice) < 0.6)
    for i = 1:indice,
        if (f(i) > 0.2) & (f(i) < 0.32)                % Localiza índice inferior
            nx1 = i;
        end
    end
    for i = indice:indice*2
        if f(i) < 0.72                                % Localiza índice superior
            nx2 = i;
        end
    end
end

% Determina a regressão linear dos pontos
POLYX = f(nx1:nx2);
POLYZ = aten(nx1:nx2);
for cont = 1:(nx2 - nx1 + 1), POLYY(cont) = POLYZ(cont); end;
[coefic,erros] = polyfit(POLYX,POLYY,1);

fprintf(fres,'%f\n',coefic(1));
fprintf(fres,'%f\n',coefic(2));

regressao = coefic(2) + coefic(1)*POLYX;
[reta,erro] = sprintf(' Aten = %g + %g*f',coefic(2),coefic(1));

% Plota Zoom do Sinal de Atenuação Específica
plot(f(1:N/escala_f),aten(1:N/escala_f),'k-'), title('Atenuação em Banda Larga (BUA)'),
xlabel('Frequência (MHz)'), ylabel('Atenuação (dB)'), text(f(12),aten(1),reta);
hold on;

% Plota a regressão no mesmo gráfico
plot(f(nx1:nx2),regressao,'k*--')% , text(f(nx1),regressao(1),reta);
disp('Atenuação Específica');
disp('Aperte qualquer tecla para continuar. ');
pause;
close;
clc;

buffer_coef1(1,index)=coefic(1);
buffer_coef2(1,index)=coefic(2);
index=index+1;
%fprintf(fres,'%f %f\n',coefic(2),coefic(1));
end,
%return;
pause;

med=0;
index=index-1;
med=(buffer_coef1(1,index)+buffer_coef1(1,index-1))/2

while index ~= 2
    index=index-1;
    med= (med + buffer_coef1(1,index-1))/2;
end;

[buamed] = sprintf('Atenuação em Banda Larga (BUA): MÉDIA = %f,med);

fprintf(fres,'%f\n',med);
fclose('all');

%plot(buffer_coef2,r*), xlabel('Pontos Adquiridos'),
plot(buffer_coef1,'k*'), xlabel('Pontos Adquiridos'),
ylabel('BUA (dB/MHz)'), title(buamed);
pause;

% Finaliza o arquivo, limpando a tela e as variáveis
clear;
echo off;
disp('FIM');
```

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- AL-KARMI, A. M.; DINNO, M. A.; STOLTZ, D. A.; CRUM, L. A.; MATTHEWS, J. C. Calcium and effects of ultrasound on frogs skin. **Ultrasound in Medicine and Biology**, v. 20, n. 1, p. 73-81, 1994.
- ALVES, J. M.; XU, W.; LIN, D. SIFFERT, R. S.; RYABY, J. T.; KAUFMAN, J. J. Ultrasonic assessment of human and bovine trabecular bone: A comparison study. **IEEE Transactions on Biomedical Engineering**, v. 43, n. 3, p. 249-258, 1996.
- ARNOLD, F. J. **Mapeamento de campos ultra-sônicos**. Dissertação (Mestrado em Física) - Universidade de São Paulo - USP, Ribeirão Preto, 1990.
- BALDEWECK, T.; LAUGIER, P.; HERMENT, A.; BERGER, G. Application of autoregressive spectral analysis for ultrasound attenuation: Interest in highly attenuating medium. **IEEE Transactions on Ultrasound, Ferroelectrics, and Frequency Control**, v. 42, n. 2, p. 1181-1186, 1993.
- BRONZINO, J. D. **Biomedical engineering and instrumentation: Basic concepts and application**. BWS-Kent, p. 347-386, 1986.
- CHEN, T.; TZENG, J. S.; LIN, C. J. A novel method to measure acoustic speed of bone tissue. **Ultrasound Medicine and Biology**, v. 23, n. 9, p. 1337-1341, 1997.
- CHRISTENSEN, D. A. **Ultrasonic Bioinstrumentation**. New York: John Wiley & Sons, 1988, 235p.
- DROIN, P., BERGER, G., LAUGIER, P. Velocity of acoustic waves in cancellous bone **IEEE Transactions on Ultrasound, Ferroelectrics, and Frequency Control**, v. 45, n. 3, p. 581-592, 1998.
- DUBOIS, E.F.L.; VAN DEN BERGH, J.P.W.; SMALS, A.G.H.; VAN DEN MEERENDONK, C.W.D.; ZWINDERMAN, A.H.; SCHWEITZER, D.H. - Comparison of quantitative ultrasound parameters with dual energy X-ray absorptiometry in pre-and postmenopausal women. **The Netherlands Journal of Medicine**, v. 58, p. 62-70, 2001.

- DUARTE, M. A.; MACHADO, J. C.; PEREIRA, W. C. A. Método para classificação de ecos reais e de reverberação em meios homogêneos, multicamadas. **Revista Brasileira de Engenharia Biomédica**, v. 15, n. 3, p. 159-174, 1999.
- ERIKSON, K. R.; FRY, F. J. Ultrasound in Medicine – A Review. **IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics**, v. 21, n. 3, p. 144-170, 1974.
- FISH, P. **Physics and instrumentation of diagnostic medical ultrasounds**. New York: John Wiley & Sons, 1990, 250p.
- FREDERICK, J. R. **Ultrasound engineering**. New York: John Wiley & Sons, 1965, 379p.
- FUNKE, M.; KOPKA, L.; VOSSHENRICH, R.; FISCHER, U.; UEBERSCHAER, A.; OESTMANN, J.; GRABBE, E. - Broadband ultrasound attenuation in the diagnosis of osteoporosis: correlation with osteodensitometry and fracture. **Radiology**, v. 194, n. 1, p. 77-81, 1995.
- GEDDES, L. A.; BAKER, L. E. **Principles of Applied Biomedical Instrumentation. Ultrasonic Bioinstrumentation**. 3. ed. New York: John Wiley & Sons: 1989, 961p.
- GIESEY, J. J.; STEMM, C. A.; ROTH, D. A. Attenuation and velocity imaging of bone tissue. **IEEE Transactions on Ultrasound, Ferroelectrics, and Frequency Control**, v. 43, n. 4, p. 1447-1450, 1990.
- GREENLEAF, J. F.; CHANDRASEKARAN, K.; MCCANN, H. A. Advance tissue analysis and display with ultrasound. **Revista Brasileira de Engenharia, Caderno de Engenharia Biomédica**, v. 4, n. 2, p. 49-60, 1987.
- GRIMM, M. J.; WILLIAMS, J. L. Use of ultrasound attenuation and velocity to estimate Young's modulus in trabecular bone. **IEEE Transactions on Ultrasound, Ferroelectrics, and Frequency Control**, v. 42, p. 62-63, 1993.
- HULL, J. B.; LANGTON, C. M.; BARKER, S.; JONES, A. R. Identification and characterization of materials by broadband ultrasonic attenuation analysis. **Jornal of Materials Processing Technology**, v. 56, n. 3, p. 148-157, 1996.
- KINSLER, L. E.; FREY, A.R. **Fundamentals of acoustics**. New York: John Wiley & Sons, 1950, p. 162-197.

- LANGTON, C. M.; PALMER S. B.; PORTER, R. W. The measurement of broadband ultrasonic attenuation in cancellous bone. **Engineering in Medicine**, v. 13, n. 2, p. 89-91, 1984.
- LAUGIER, P.; FOURNIER, B.; BERGER, G. Ultrasound parametric imaging of bone in vivo. **Engineering in Medicine**, v. 13, n. 2, p. 89-91, 1995.
- LE, L. H. An investigation of pulse-timing techniques for broadband ultrasonic velocity determination in cancellous bone: A simulation study. **Phys. Med. Biol.**, v. 43, n. 6, p. 2295-2308, 1998.
- MAIA, J. M. **SPEM: Sistema Pulso-Eco Microcontrolado para Geração e Medição de Campos Ultra-Sônicos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas, 1995.
- MAIA, J. M. **Sistema ultra-sônico para auxílio ao diagnóstico da osteoporose**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas, 2001.
- MAIA, J. M.; COSTA, E. T.; BUTTON, V. L. S. N.; MARQUES NETO, J. F. - An ultrasound system for the diagnosis of osteoporosis. **Proceedings of the 26<sup>th</sup> International Acoustical Imaging Symposium**, Windsor, v. 26, p. 77-82, 2001.
- MAIA, J. M.; COSTA, E. T.; BUTTON, V. L. S. N.; MARQUES NETO, J. F. - BUA osteoporosis diagnostic with single position vs scanning systems: a comparative study. **The 2002 IEEE International Ultrasonics Symposium**, Munich, v. 1, p. 1082-1085, 2002.
- MASSIE, A.; REID, D.M.; PORTER, R.W. - Screening for osteoporosis: Comparison between dual energy X-ray absorptiometry and broadband ultrasound attenuation in 1000 perimenopausal women. **Osteopor. Int.**, v. 3, p. 107-110, 1993.
- McDICKEN, W. N. **Diagnostic ultrasonics: Principles and use of instruments**. 2. ed, New York : John Wiley & Sons, 1981, 381p.
- MORSE, P. M.; FESHBACK, H. **Methods of theoretical physics**. New York: McGraw-Hill, 1953, p.834-841.

- NATIONAL SEMICONDUCTOR, INC. **DAC0808 8-bit D/A Converter**. Folha de especificação de dados. Disponível em: <http://cache.national.com/ds/DA/DAC0808.pdf>. Acessado em: 10/05/2005a.
- NATIONAL SEMICONDUCTOR, INC. **LM723 Voltage Regulator**. Folha de especificação de dados. Disponível em: <http://cache.national.com/ds/LM/LM723.pdf>. Acessado em: 10/01/2005b.
- NICHOLSON, P. H. F.; LOWET, G.; CHENG, X. G.; BOONEN, S.; DEQUEKER, J.; VAN DER PERRE, G. Ultrasonic measurement of the calcaneus: Investigation of some error sources and correlation with femoral strength. **IEEE Engineering in Medicine and Biology Society**, v.2, n. 1, p. 477-478, 1997.
- NICHOLSON, P. H. F.; LOWET, G.; LANGTON, C. M.; DEQUEKER, J.; VAN DER PERRE, G. A comparison of time-domain and frequency-domain approaches to ultrasonic velocity measurement in trabecular bone. **Phys. Med. Biol.**, v. 41, n.5, p. 2421-2435, 1996.
- NJEH, C. F.; SAEED, I.; GRIGORIAN, M.; KENDER, D. L.; FAN, B.; SHEPHERD, J.; MCCLUNG, M.; DRAKE, W. M.; GENANT, H. K. G. Assessment of bone status using speed of sound at multiple anatomical sites. **Ultrasound in Medicine and Biology**, v. 27, n. 10, p. 1337-1345, 2001.
- OPPENHEIN, A.V.; SCHAFER, R. W. **Digital signal processing**. New Jersey: Prentice-Hall Inc., 1975, 585p.
- OKUNO, E.; CALDAS, I. L.; CHOW, C. **Física para Ciências Biológicas e Biomédicas**. São Paulo: Haper & Row do Brasil Ltda, 1982, 490p.
- RESCH, H.; PIETSCHMANN, P.; BERNECKER, P.; KREXNER, E.; WILLVONGEDER, R. - Broadband ultrasound attenuation: A new diagnostic method in osteoporosis. **A.J.R.**, **155**, 1990.
- SHUNG, K. K. From the Guest Editor- Advances in Ultrasound. **IEEE – Engineering in Medicine and Biology**, v. 15, n. 6, p. 18-19, 1996.
- SPECTRUM DIGITAL, INC. **TMS320VC5416 DSK Technical Reference**. Stafford, U.S.A., 2002.

- STRELITZKI, R.; EVANS, J. A. An investigation of the measurement of Broadband Ultrasonic Attenuation in trabecular bone. **Ultrasonics**, v.34, n. 2, p.785-791, 1996.
- TER HAAR, G. Basic physics of therapeutic ultrasound. **Physiotherapy**, v. 64, n. 4, p.100-103, 1978.
- TER HAAR, G. Review Therapeutic Ultrasound. **European Journal of Ultrasound**, v. 9, n. 3, p. 3-9, 1999.
- TEXAS INSTRUMENTS, INC. **Data Manual - TMS320VC5416 Fixed-Point Digital Signal Processor**. Disponível em: <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/tms320vc5416.pdf>. Acessado em: 12/12/2004.
- TEXAS INSTRUMENTS, INC. **SN74LS123 Retriggerable Monostable Multivibrators**. Folha de especificação de dados. Disponível em: <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/sn74ls123.pdf>. Acessado em: 06/01/2005a.
- TEXAS INSTRUMENTS, INC. **ADS5410 EVM – User’s guide**. Disponível em: <http://focus.ti.com/lit/ug/slau082/slau082.pdf>. Acessado em: 15/01/2005b.
- TUPHOLME, G. E. Generation of acoustic pulses by baffled plane pistons. **Mathematika**, v. 16, n. 1, p. 209-224, 1969.
- WEBSTER, J. G. **Medical instrumentation: Application and design**. 3. ed., New York: John Wiley & Sons, 1998, 691p.
- WEAR, K. A. The effects of frequency-dependent attenuation and dispersion on sound speed measurements: Application in human trabecular bone. **IEEE Transactions on Ultrasound, Ferroelectrics, and Frequency Control**, v. 47, n. 1, p. 265-273, 2000.
- WEAR, K. A.; ARMSTRONG, D. W. The relationship between ultrasonic backscatter and bone mineral density in human calcaneus. **IEEE Transactions on Ultrasound, Ferroelectrics, and Frequency Control**, v. 47, n. 4, p. 777-780, 2000.
- WEBB, S. **The physics of medical imaging**. In: S. Webb (ed.), Adam Hilger, Bristol, 1988, 633p.
- WELLS, P. N. T. **Biomedical ultrasonics**. London: Academic Press Inc, 1977, 635p.

WELLS, P. N. T. **Advances in ultrasound techniques and instrumentation.** New York: Churchill Livingstone Inc, 1993, 192p.

XU, W.; WEAR, K. A. Diffraction correction methods for insertion ultrasound attenuation estimation. **IEEE Transactions on Biomedical Eng.**, v. 40, n. 6, p. 563-570, 1993.

YOUNG, S. R. **The effect of therapeutic ultrasound on the biological mechanisms involved in dermal repair.** Tese (Doutorado em Física) - University of London, London, 1990.

A utilização do ultra-som como alternativa às técnicas que utilizam radiação por raio-X, além de apresentar características não invasivas e não ionizantes, demanda baixo custo e possibilita a obtenção de informações das propriedades elásticas dos materiais. O presente trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema de aquisição e processamento de sinais por ultra-som para caracterização de meios biológicos e não biológicos. O sistema pode ser utilizado para realizar medidas da velocidade de propagação do som e atenuação da amplitude das ondas ultra-sônicas, além do processamento matemático da curva de atenuação em função da frequência para o cálculo da atenuação em banda larga (BUA). O *hardware* do sistema desenvolvido é composto por uma placa de controle e gerenciamento com o DSP TMS320VC5416 da Texas Instruments e uma placa com os circuitos lógicos, circuitos de transmissão e circuitos de recepção. Além disto, foram desenvolvidas *drivers* de potência para acionamento de motores de passo, utilizados para posicionamento dos transdutores de ultra-som nos testes de varredura de regiões de interesse. Os dados adquiridos pela unidade de recepção do sistema são enviados para um microcomputador via interface USB, onde são processados e arquivados. Os testes para avaliação do desempenho do sistema foram realizados no Laboratório de Engenharia Biomédica da UTFPR, com a geração de ondas ultra-sônicas nos métodos de transmissão-recepção e pulso-eco, utilizando-se dois transdutores de ultra-som com frequência central de 500 kHz, imersos em um pequeno tanque com água, para caracterizar diferentes meios de propagação (leite, acrílico, alumínio e pedra pome). Os resultados demonstraram que o sistema é adequado para fins de pesquisa, possibilitando novas aplicações, como no auxílio ao diagnóstico da osteoporose.

### **PALAVRAS-CHAVE**

Ultra-som, Método Transmissão-Recepção, Método Pulso-Eco, Velocidade do Som, Atenuação em Banda Larga.

### **ÁREA/SUB-ÁREA DE CONHECIMENTO**

3.13.00.00 – 6 Engenharia Biomédica

3.04.02.04 – 2 Instrumentação Eletrônica

2006 Nº 386
----------------

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)