

LUIZ HENRIQUE MAIORINO BARBARINI

3

*nota final
9.4 (muito - muito)*

Nom


**DESENVOLVIMENTO DE UM MEDIDOR DE ESPESSURA DE TECIDO
ADIPOSO POR ULTRA-SOM**

Trabalho de formatura do curso de graduação
apresentado ao Departamento de Engenharia
Mecatrônica e Sistemas Mecânicos da Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo

São Paulo
2004

LUIZ HENRIQUE MAIORINO BARBARINI

**DESENVOLVIMENTO DE UM MEDIDOR DE ESPESSURA DE TECIDO
ADIPOSO POR ULTRA-SOM**

Trabalho de formatura do curso de graduação
apresentado ao Departamento de Engenharia
Mecatrônica e Sistemas Mecânicos da Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo

Área de Concentração:
Engenharia Mecatrônica

Orientador:
Prof. Dr. Julio Cezar Adamowski

São Paulo
2004

Aos meus familiares que compartilharam este sonho junto comigo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Julio Cezar Adamowski pela sua disposição e prontidão em sempre me ajudar neste trabalho.

Aos amigos Nilson Noris Franceschetti e Paulo de Tarso Peres pelo apoio permanente nos momentos difíceis deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho apresenta o estudo, desenvolvimento e implementação de um equipamento de medição de espessura de tecidos adiposos em seres humanos. Atualmente, a medição da porcentagem de gordura corpórea é feita principalmente através de um instrumento mecânico, do tipo compasso, denominado adipômetro ou com um equipamento eletrônico que utiliza a técnica de medição da bioimpedância. O equipamento desenvolvido utiliza um sistema de emissão e recepção de ultra-som, controlado por um micro-controlador que processa e interpreta a medida do tempo de vôo de propagação da onda. Serão descritas as especificações do projeto e as características do controlador, além de um estudo para cálculo da resolução e espessuras mínima e máxima aceitáveis. Apresentam-se os requisitos de ultra-som e os ensaios feitos em laboratório para estimativa de parâmetros acústicos. Apresenta-se também uma explanação detalhada do sistema de controle, incluindo configurações do temporizador para medição do tempo de vôo, interrupções para detecção de eco válido, software e acionamento de display de cristal líquido.

ABSTRACT

This report presents the development and implementation of adipose tissue thickness meter equipment. Nowadays, these measurements are made by two kinds of distinct equipments. One of them is a mechanic instrument like a compass called adipometer, the other is an electronic equipment that uses the bioimpedance technique. The equipment that has been developed uses an ultrasonic emission and reception system, controlled by a micro-processor, responsible for processing and interpreting the time of flight of the ultra-sonic wave. It is also presented the project specifications, technical characteristics of the micro-controller chosen and the study of the resolution of the systems and minimum and maximum thickness acceptable. A detailed description of the software implemented for control and processing the signal is presented at the end, when it is explained the implementation of interruptions, timers, and the liquid crystal display routines.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE ABREVIATURAS

LISTA DE SÍMBOLOS

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Aparelhos de medição de gordura no mercado.....	1
1.2 Comparação entre as técnicas existentes no mercado	2
1.3 Princípio de funcionamento	3
2. REQUISITOS DE PROJETO	5
2.1 Precisão e resolução	5
2.2 Freqüência do transdutor	6
2.3 Detectabilidade do eco	7
3. DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO.....	9
3.1 Descrição do hardware.....	9
3.1.1 Fonte.....	10
3.1.2 Pulsador	10
3.1.3 Fonte Charge Pump com 555.....	10
3.1.4 Fonte de baixa perda de 5V	11
3.1.5 Amplificador de sinais de alta freqüência	11
3.1.6 Detector de eco	12
3.2 Micro-controlador	12
3.2.1 Características técnicas	12
3.2.2 Número de entradas/saídas	14
3.2.3 Clock do processador	15
3.2.4 Contador	15
3.2.5 Esquema de ligação.....	17
3.3 Software de controle	17
4. SISTEMA DE CONTROLE.....	21
4.1 Configuração do micro-controlador para a aplicação em questão	21
4.1.1 Entradas e saídas	21

4.1.2 Configuração do Contador	21
4.1.3 Interrupções	23
4.2 Acionamento do display	24
5. ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS ATRAVÉS DE ENSAIOS COM GORDURA EM LABORATÓRIO	27
5.1 Medição da velocidade de propagação.....	28
5.2 Medição da atenuação do sinal.....	29
6.1 Conceitos envolvidos.....	32
6.2 Primeiros ensaios para construção do transdutor.....	33
6.3 Construção do transdutor com cerâmica bipartida	34
7. RESULTADOS	36
8. CONCLUSÕES.....	38
LISTA DE REFERÊNCIAS	39

APÊNDICE – Código Fonte do Programa do Controlador

Apêndice A - Programa principal

Apêndice B - Constantes de açãoamento de display, tempo e ultra-som

ApêndiceC - Registradores do controlador

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Reflexão e transmissão de uma onda acústica.....	3
Figura 2. Princípio de funcionamento do aparelho.....	4
Figura 3. Diagrama de blocos com os componentes do aparelho.....	9
Figura 4. Foto do hardware do protótipo implementado	10
Figura 5. Fonte -5V implementada com 555	11
Figura 6. Diagrama da arquitetura da CPU08.....	13
Figura 7. Principais características operacionais do HC08.....	14
Figura 8. Desenho do chip e função dos pinos	14
Figura 9. Esquema de funcionamento da pré-escala do contador.....	16
Figura 10. Faixa de freqüência e resolução da contagem do timer (assumindo freqüência do barramento de 8 MHz).....	16
Figura 11. Esquema de ligação dos circuitos com o micro-controlador.....	17
Figura 12. Janela de tempo para a procura do eco.....	18
Figura 13. Diagrama de blocos do software de controle	20
Figura 14. Funcionalidade dos pinos do chip para a aplicação em questão	21
Figura 15. Matriz de caracteres do LCD.....	24
Figura 16. Foto do laboratório e do tanque com manipulador.....	27
Figura 17. Detalhe da gordura utilizada para os ensaios: peça de panceta.....	28
Figura 18. Exemplo do sinal obtido na medição da velocidade da peça de gordura .	29
Figura 19. Sinal da medida de espessura no alumínio com 0db de ganho	30
Figura 20. Eco na panceta com ganho igual a 20dB.....	31
Figura 21. Esquema de um transdutor de ultra-som	33
Figura 22. Foto do protótipo de transdutor construído com elemento bipartido	34
Figura 23. Foto do transdutor construído.....	35
Figura 24. Foto do protótipo do equipamento	37

LISTA DE TABELAS

Tabela I. Constantes do equipamento especificadas no projeto	22
Tabela II. Resolução e valores de contagem para os tempos das janelas	22
Tabela III. Mapa das interrupções do controlador e respectivas prioridades	24
Tabela IV. Pinagem do LCD	25
Tabela V. Tabela de caracteres do LCD	26

LISTA DE ABREVIATURAS

BCD	Binary Code
CDE	Circuito Detector de Eco
CPU	Central Processing Unit
HC08	Micro-controlador Motorola MC68HC908QY4
LCD	Liquid Cristal Display
USP	Universidade de São Paulo

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Atenuação de amplitude da onda
α_0	Constante de atenuação
λ	Comprimento de onda
C_0	Capacitância elétrica da cerâmica
L_0	Indutância calculada para o transdutor
f_r	Freqüência de ressonância

1. INTRODUÇÃO

1.1 Aparelhos de medição de gordura no mercado

Atualmente, a medição da porcentagem de gordura corpórea é feita principalmente através de um instrumento especial (tipo compasso) denominado adipômetro. O adipômetro funciona no mesmo princípio de um micrômetro que mede a distância entre dois pontos. A medida das dobras cutâneas para calcular a gordura corporal total justifica-se porque existe uma relação entre a gordura localizada, diretamente abaixo da pele e a gordura interna, e ambas as medidas estão relacionadas com a densidade corporal. É muito utilizada em programas de condicionamento físico, que envolvem a perda de gordura localizada.

O procedimento para medir a espessura das dobras cutâneas é segurar uma dobra de pele e posicionar as hastes do adipômetro sobre a dobra cutânea de forma que esta se encontre entre as duas hastes; a tensão aplicada sobre a pele pelo adipômetro é de aproximadamente 10g/mm². As áreas mais comuns para medidas de dobras cutâneas são o tríceps, subescapular, suprailíaca, abdominal e coxa.

Um outro equipamento eletrônico existente no mercado também é muito utilizado para a medição de gordura. Este aparelho utiliza técnica de bioimpedância, cujo princípio é o fato de que o fluxo de eletricidade é facilitado através de tecidos hidratados e livres de gordura e na água extracelular, em comparação com o tecido gorduroso. Isso ocorre devido a grande quantidade de eletrólitos (e baixa resistência elétrica) dos componentes livres de gordura.

Essa técnica consiste em aplicar um sinal elétrico localizado e medir a impedância (resistência do tecido à tensão ou corrente). Eletrodos são colocados nos pés e nas mãos e o fluxo da corrente é determinado. O valor da impedância é utilizado para o cálculo da densidade corporal enquanto que o valor da densidade corporal fornece a porcentagem de gordura corporal, através da equação de Siri (Fox, 1991):

$$\% \text{ gordura corporal} = (4,95 \div \text{densidade corporal} - 4,50) \times 100 \quad (1)$$

Os cálculos para determinação de tais valores e alguns outros (como % massa magra, % água corporal e relação massa magra/gordura) são feitos por um software específico que utiliza os valores de resistência e reatância (num circuito de corrente alternada, o módulo da parte imaginária da impedância do circuito) fornecidos pelo aparelho de bioimpedância.

Alguns fatores podem alterar a precisão da bioimpedância. Entre eles destacam-se o estado de hidratação do indivíduo e a temperatura da pele (que pode afetar a resistência do corpo inteiro quando influenciada pela temperatura ambiente). Este equipamento é comercializado acoplado principalmente a balanças e aparelhos de ginástica.

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um aparelho com as mesmas funções dos aparelhos descritos acima, porém utilizando a técnica de ultra-som. Existem equipamentos aplicados ao diagnóstico médico que utilizam técnicas muito avançadas de processamento de sinais, capazes até de fazer imagens tridimensionais de órgãos do corpo humano. No entanto, o instrumento a ser desenvolvido deve ter um baixo custo e ser de fácil utilização.

1.2 Comparação entre as técnicas existentes no mercado

Comparando-se medições por ultra-som e adipômetro, segundo Oliveira (1987) foi constatado uma diferença significativa entre as duas técnicas. Obteve-se uma menor dispersão nas medidas feitas por ultra-som em relação ao adipômetro. Além disso, os estudos de equações de regressão para predizer a espessura dos tecidos adiposos apresentaram uma alta capacidade de predição. Isto indica que o dado colhido pela técnica de ultra-som é um dado confiável para a estimativa da espessura dos tecidos.

Em relação à técnica de bioimpedância, o ultra-som possui a vantagem de não depender de fatores como a hidratação, além de fazer a medição de uma grandeza de simples interpretação como a espessura do tecido.

A precisão obtida com técnicas de ultra-som também pode ir muito além das especificações de um aparelho como este para esta aplicação, podendo chegar a décimos de milímetro facilmente. A precisão do aparelho em questão e os requisitos do projeto serão discutidos mais adiante.

1.3 Princípio de funcionamento

Este equipamento baseia-se na emissão e recepção de ondas acústicas. Quando uma onda acústica que se propaga em um meio encontra uma interface com um outro meio, uma parte da onda acústica é transmitida e a outra refletida. A onda acústica incidente será representada por p_i , a onda transmitida por p_t e a refletida por p_r de acordo com Figura 1 (Brizzotti, 2003).

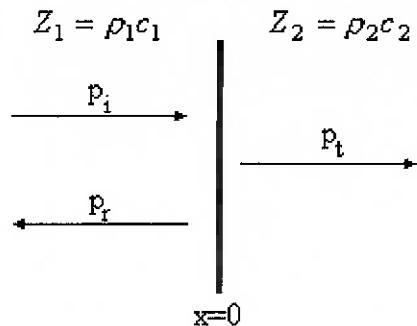


Figura 1. Reflexão e transmissão de uma onda acústica

Conhecendo-se a velocidade que uma onda se propaga em um meio, e medindo-se o tempo de vôo dessa onda, ou seja, o tempo que a onda se propaga entre a emissão e a sua recepção, é possível determinar a distância percorrida, e portanto, medir a espessura do meio.

O equipamento descrito a seguir, implementa medidor de espessura convencional, porém calibrado para uma aplicação específica: a medição da camada de gordura em seres humanos. Ou seja, trata-se um hardware responsável pela emissão e recepção das ondas de ultra-som, e processamento da medida do tempo para a obtenção de um valor válido de espessura de gordura, pressupondo que a velocidade de propagação na gordura terá um valor médio para todo o corpo, e que existirá uma onda refletida entre a interface de gordura e do tecido mais interior no corpo.

Os transdutores de emissão e recepção das ondas de ultra-som são construídos a partir de cerâmicas piezelétricas tipo PZT5-A. A **Figura 2.** ilustra, simplificadamente, o princípio de funcionamento do aparelho.

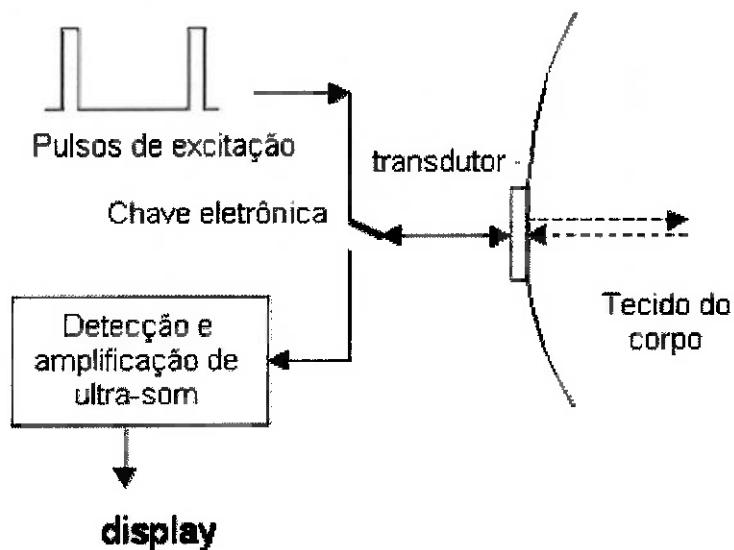


Figura 2. Princípio de funcionamento do aparelho

2. REQUISITOS DE PROJETO

2.1 Precisão e resolução

Como requisito de projeto, o parâmetro principal é a precisão com que a medida da espessura será apresentada. Neste tipo de aplicação, alguns fatores podem vir a influenciar na medida, como por exemplo, a temperatura. A velocidade de propagação de uma onda ultra-sônica em um meio é varia com a temperatura. Entretanto, considerando-se que a temperatura corpórea é mais ou menos estável em torno dos 36,5° C, basta sabermos o valor da velocidade de propagação para esta temperatura, e podemos desprezar a influência deste fator.

Outro fator observado nos ensaios em laboratório é que, ao se posicionar o transdutor sobre a pele, a pressão exercida pelo transdutor no corpo faz com que este penetre no corpo e altere a espessura real do tecido adiposo. A fim de se contornar este problema, recomenda-se a não utilização de transdutores com diâmetros muito pequenos. Outro modo é utilizar um suporte para o transdutor de forma que a área de contato com a superfície a ser medida aumente.

Levando em conta principalmente este último ponto apresentado e as expectativas do usuário com o aparelho, foi considerada uma precisão aceitável de 1 mm. Também adotou-se que a velocidade de propagação do som na gordura não varia nas diversas áreas do corpo, e que seu valor médio é de 1497 m/s (Wells, 1977).

Para avaliarmos a resolução do aparelho devemos levar em consideração o micro-controlador que será utilizado. O chip adotado será o Motorola MC68HC908QY4 e suas características são descritas no capítulo que trata o sistema de controle do equipamento.

O micro-controlador HC08, admite um clock externo de até 32 MHz, sendo esta taxa dividida por 4, uma vez que o ciclo de execução das instruções mais simples são formadas dor 4 ciclos de clock interno. Assim, se a CPU receber o sinal de um clock

externo, a freqüência de execução será um quarto da freqüência do cristal. O clock externo será utilizado para garantir precisão dos tempos de vôo.

Considerando a precisão da medida de 1 mm, um valor de resolução aceitável pode ser obtido utilizando-se um clock de contagem de 5 MHz. Podemos então avaliar a resolução das medidas segundo a eq.(2).

$$\text{resolução} = v \cdot t = 1,5 \frac{\text{mm}}{\mu\text{s}} \cdot \frac{1}{5\text{MHz}} \cdot \frac{1}{2} = 0,15\text{mm} \quad (2)$$

Onde v é a velocidade aproximada de propagação na gordura (foi adotada neste cálculo a velocidade de propagação da água, que é muito próxima), e t é o menor tempo de vôo que se pode medir. Pelo fato de termos o caminho de ida e volta do eco, o tempo t está dividido por dois. Portanto, o aparelho terá uma resolução de aproximadamente 0,15 mm e uma precisão de 1 mm.

Para a contagem do tempo no micro-controlador será utilizado um contador interno. O tamanho do contador deve atender o número de bits mínimo para a contagem do tempo determinada pela freqüência do clock. Estimando-se um percurso máximo de 200 mm (isto é, uma espessura de 100mm de tecido adiposo), teremos:

$$t_{máximo} = \frac{d_{máx}}{v} = \frac{200\text{mm}}{1,5 \frac{\text{mm}}{\mu\text{s}}} = 133 \cdot 10^{-6}\text{s} \rightarrow 133 \cdot 10^{-6}\text{s} \cdot 5\text{MHz} = 666 \quad (3)$$

Valor que requer 10 bits para a contagem. Logo, precisaremos de um contador de no mínimo 10 bits para a contagem do tempo. Esta condição é satisfeita pelo HC08, que possui um contador de 16 bits.

2.2 Freqüência do transdutor

Outro parâmetro a ser especificado é a freqüência do transdutor a ser utilizado. Quanto maior a freqüência do transdutor mais precisa é a medida. Porém, da eq.(4) vemos que a atenuação da onda varia também conforme se aumenta a freqüência.

$$\alpha(f) = \alpha_0 \cdot f [db/cm] \quad \text{para a gordura: } \alpha_0 = 0.6 \quad (4)$$

Onde α é a atenuação e α_0 é uma constante que depende do meio e f é a freqüência em MHz. No caso da gordura, esta variação é linear, para líquidos como a água a variação é quadrática.

Segundo Wells (1977), a freqüência de transdutor recomendada é em torno de 1 MHz para aplicações em tecidos. Adotou-se uma freqüência de 2 MHz para o transdutor, a fim de estabelecer o melhor compromisso de resolução axial e atenuação. De acordo com os ensaios feitos, que são detalhado nos capítulos seguintes, a atenuação ainda não prejudica a recepção do eco, ao passo que com 5 MHz, a atenuação já é considerável para o caso.

2.3 Detectabilidade do eco

Para a análise da detectabilidade do eco correspondente à espessura mínima especificada faremos o seguinte: primeiramente, calculamos qual será o comprimento de onda no meio (Kinsler, 1982). Utilizaremos o valor da freqüência do transdutor de 2 MHz.

$$v = \lambda \cdot f \rightarrow \lambda = \frac{1,5 [mm/\mu s]}{2 \cdot 10^6 [1/s]} = 0,75 mm \quad (5)$$

Assumindo uma distância de 5 mm como a espessura mínima que desejamos medir (multiplicado por dois por ser ida e volta do eco), podemos calcular quantos comprimentos de onda cabem no intervalo de tempo entre o disparo do pulso e o eco correspondente a uma espessura de 5mm:

$$\frac{5mm \cdot 2}{0,75mm} = 13,33 \text{ Comprimentos de onda} \quad (6)$$

Isto quer dizer que cabem 13 comprimentos de onda no sinal antes de recebermos o eco. Considerando que a onda do pulso emitido é amortecida e que um transdutor típico para aplicações médicas oscilará por volta de 5 vezes antes ter sua amplitude consideravelmente atenuada, obtemos que existe uma folga para que o eco não interfira com a excitação do transdutor. Ou seja, para a espessura mínima especificada, podemos garantir que não haverá interferência entre o pulso emitido pelo transdutor e o sinal do eco.

3. DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO

3.1 Descrição do hardware

O hardware do equipamento consiste em circuitos de ultra-som, como emissor e receptor, e fontes de tensão, e circuitos de interface e controle, que são circuitos do micro-controlador e acionamento do display. O hardware de ultra-som foi projetado pelo grupo de pesquisas de ultra-som do Departamento de Engenharia Mecatrônica e Sistemas Mecânicos da USP. Alguns destes circuitos já foram utilizados também em outros projetos, como aplicações de inspeção de dutos petrolíferos. Os outros circuitos foram desenvolvidos pelo aluno utilizando uma lógica própria de ligação.

A Figura 3 mostra o diagrama de blocos de todos os circuitos do sistema. Em verde, aparece o bloco de interface com o usuário e, em azul, estão os sensores que captam e emitem os sinais para o meio físico.

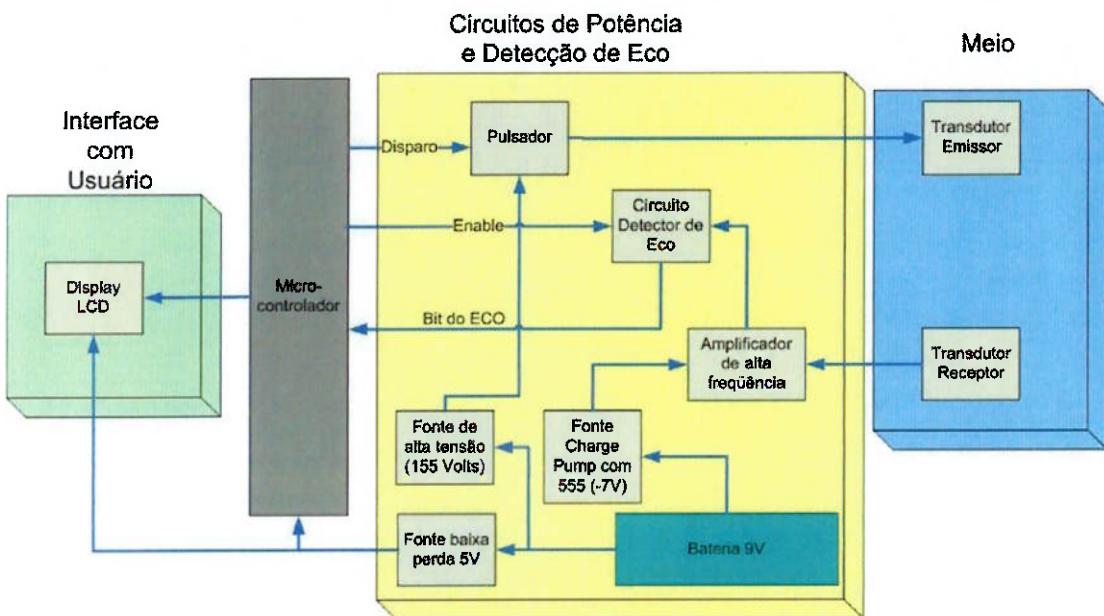


Figura 3. Diagrama de blocos com os componentes do aparelho

A implementação do protótipo do equipamento foi feita pelo aluno em placa universal (Figura 4). O protótipo pode ser alimentado tanto por bateria 12 Volts

quanto por uma fonte DC externa de 9 a 12 Volts. Um LED vermelho, quando aceso, indica sinal de bateria baixa, e um LED verde, indica o funcionamento dos disparos para o pulsador.

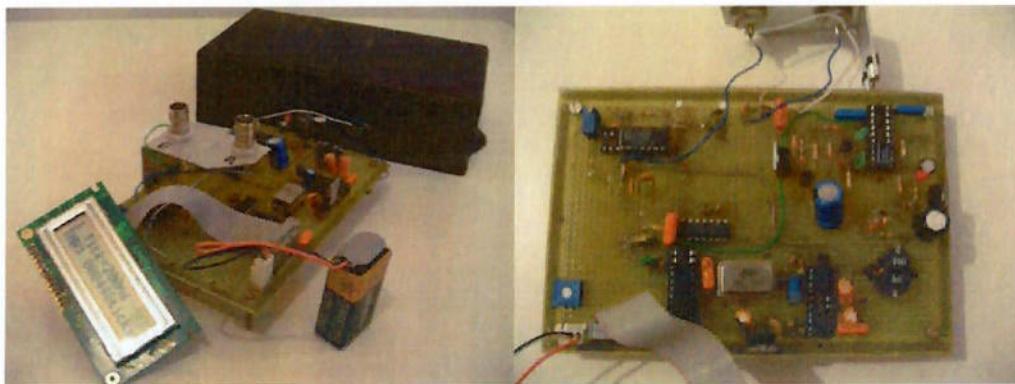


Figura 4. Foto do hardware do protótipo implementado

A seguir, apresenta-se uma breve explicação de cada bloco mostrado na Figura 3.

3.1.1 Fonte

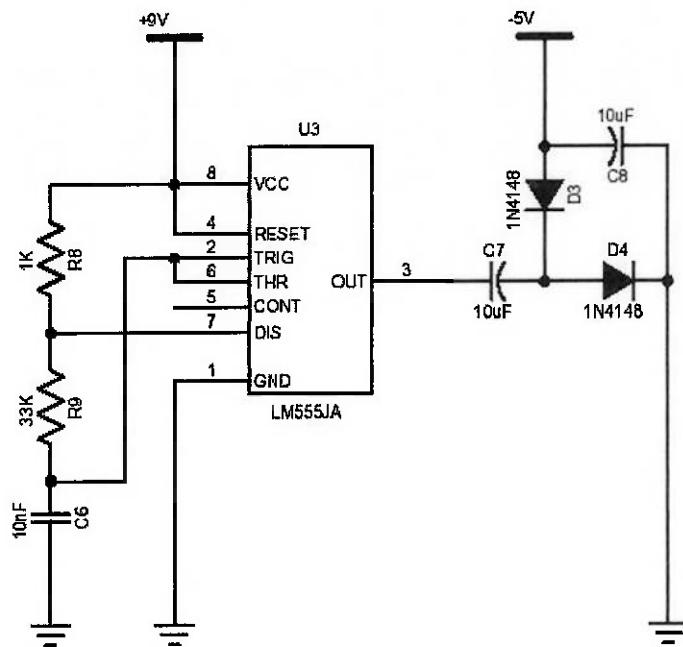
Trata-se de uma fonte chaveada de alta tensão que recebe uma tensão de 9 Volts da bateria e tem como saída 155 Volts. A tensão de saída permanece constante ainda que abaixemos a tensão de entrada. O circuito integrado que implementa a fonte também possui um pino indicador de bateria baixa, que está conectado a um LED. Este acende quando a bateria fornece uma tensão menor que 5 Volts.

3.1.2 Pulsador

Este circuito é alimentado por uma tensão de 9 Volts, e recebe a tensão de 155 Volts da fonte, gerando um impulso com -155 Volts de tensão. Este circuito é disparado pelo micro-controlador.

3.1.3 Fonte Charge Pump com 555

Este tipo de fonte foi utilizado para alimentarmos com uma tensão negativa o amplificador operacional do circuito de amplificação. Trata-se de um arranjo com o oscilador 555, capacitores e diodos, que fornece uma tensão de -7 Volts aproximadamente. Esta foi a solução mais simples encontrada para gerar a tensão negativa necessária.



FONTE -5V @ 10mA NAO-REGULADA

Figura 5. Fonte -5V implementada com 555

3.1.4 Fonte de baixa perda de 5V

Esta gera a tensão de 5 Volts para alimentar o LCD e o micro-controlador a partir dos 9 V da pilha. Trata-se de uma fonte especial para não descarregar a bateria demasiadamente, ao reduzir a tensão.

3.1.5 Amplificador de sinais de alta freqüência

Este circuito utiliza um amplificador operacional de alta freqüência (Philips NE5539) ajustado para um ganho de 28dB. Este amplificador pode operar com ganhos de

aproximadamente de 10dB, na faixa de freqüência de 100 MHz, podendo ser utilizado em freqüências até maiores. Para o nosso caso, foi construído o circuito recomendado pelo fabricante, com o layout fornecido no manual, uma vez que o circuito é muito sensível ao layout de montagem.

3.1.6 Detector de eco

Este circuito é implementado com um flip-flop tipo D (74HC74). Sua função é comparar o sinal de saída do amplificador com uma faixa de tensão, e enviar um bit para o controlador no instante em que o sinal do eco atinge determinado nível de tensão. O controlador, por sua vez, habilita e desabilita este circuito através do pino de clear (CLR) do componente.

3.2 Micro-controlador

3.2.1 Características técnicas

Para o controle do hardware de potência de ultra-som, ou seja, o circuito responsável por excitar e captar os sinais elétricos do transdutor de ultra-som, utilizaremos um micro-controlador da família HC08 da Motorola. O componente utilizado é do modelo MC68HC908QY4, de 16 pinos.

Este micro-controlador possui as seguintes características, segundo seu “Data Sheet”:

- 64 Kbytes endereçáveis para memória de programa, dados e periféricos.
- Barramento interno flexível para acessar periféricos
- Modo baixo de consumo STOP e WAIT
- Código objeto compatível com a família MC68HC805
- Registrador de 16 bits de índice H:X com manipulação byte alto e byte baixo.
- Instruções rápidas de multiplicação de 8 bits por 8 bits e divisão 16 bits por 8 bits
- Instruções rápidas para manipulação de dados em BCD

- 13 pinos bidirecionais de entrada/saída e 1 pino de entrada
- Entrada para oscilador a cristal com freqüência máxima de 32 MHz
- Contador de 16 bits com 7 seleções de pré-escala

Sua arquitetura pode ser vista através do diagrama da Figura 6.

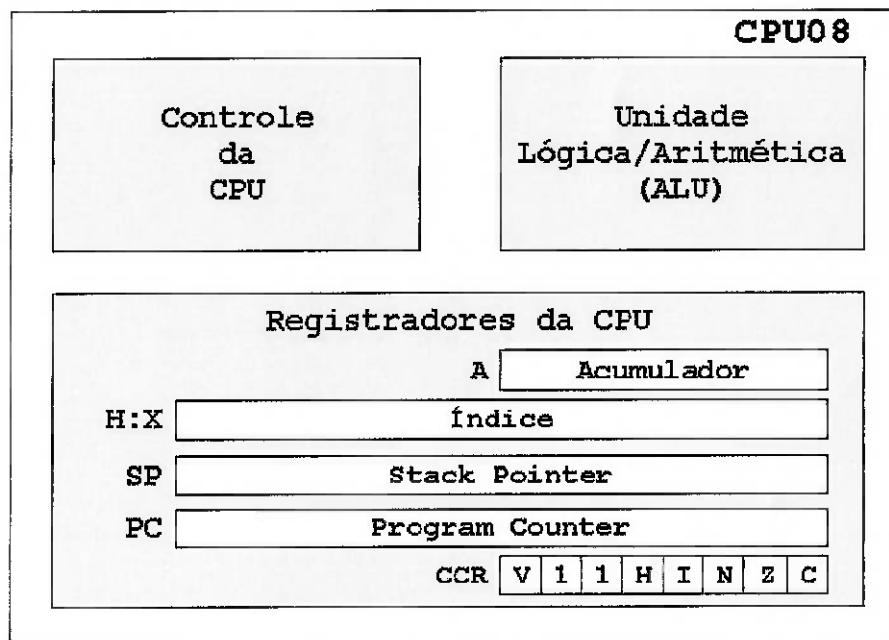


Figura 6. Diagrama da arquitetura da CPU08

As principais características técnicas e operacionais do componente podem ser vistas na Figura 7. A especificação do HC08 da Motorola foi feita considerando os requisitos de projeto como o número de entrada e saída, contador e freqüência de clock.

Characteristic ⁽¹⁾	Symbol	Value	Unit
Supply voltage	V _{DD}	-0.3 to +6.0	V
Input voltage	V _{IN}	V _{SS} -0.3 to V _{DD} +0.3	V
Mode entry voltage, IRQ pin	V _{TST}	V _{SS} -0.3 to +9.1	V
Maximum current per pin excluding PTA0–PTA5, V _{DD} , and V _{SS}	I	±15	mA
Maximum current for pins PTA0–PTA5	I _{PTA0} –I _{PTA5}	±25	mA
Storage temperature	T _{STG}	-55 to +150	°C
Maximum current out of V _{SS}	I _{MVSS}	100	mA
Maximum current into V _{DD}	I _{MVDD}	100	mA

1. Voltages references to V_{SS}.

Figura 7. Principais características operacionais do HC08

3.2.2 Número de entradas/saídas

O componente MC68HC908QY possui 13 pinos bidirecionais configuráveis de entrada e saída. No entanto, estes pinos são compartilhados com outras funções, como o oscilador externo e timer, e por isso, nem sempre é possível utilizá-lo como um I/O. Para o caso do controle do medidor de gordura, faz-se necessário 8 pinos de saída e pelo menos um pino como entrada. O desenho do chip indicando a funcionalidade de cada porta é visto na Figura 8 . Repare que os pinos do PORT A (PTA) são todos compartilhados com outras funções.

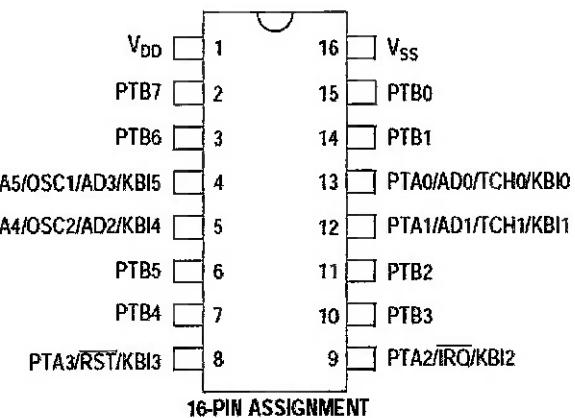


Figura 8. Desenho do chip e função dos pinos

3.2.3 Clock do processador

Nos micro-controladores da família MC68HC908QT/QY é possível implementarmos um circuito com um ressonador cerâmico ou cristal externo para fornecer uma fonte de clock precisa. A freqüência máxima pode ser de 32 MHz. O pino OSC2 pode ser configurado para entrada do clock externo.

A freqüência do barramento interno é igual a freqüência do clock dividido por quatro, uma vez que o ciclo de execução mais simples é formado por 4 fases de clock interno a CPU.

3.2.4 Contador

Conforme introduzido no tópico de requisitos de projeto, o contador é parte fundamental para a aplicação de medição de espessura por ultra-som, uma vez que o resultado será função da contagem do tempo. Para tal, é necessário termos um clock preciso e com número de bits suficiente para contarmos o tempo de reflexão da onde de ultra-som com boa resolução. O HC08 possui um contador de 16 bits (valor máximo de contagem é FFFF em hexadecimal, ou 65.535 em decimal), com 2 pinos configuráveis de entrada e saída. Para a nossa aplicação, utilizaremos apenas um dos pinos (PTA0) configurado como captura de entrada. Ou seja, o pino, ao detectar uma borda de subida do sinal gera uma interrupção do timer e salva o valor da contagem em uma posição específica da memória.

O contador do HC08 possui ainda um sistema de pré-escala, onde é possível se programar um fator que irá dividir a freqüência de clock do barramento, fazendo que a contagem ocorra em outras freqüências desejadas. A Figura 9 mostra o circuito de pré-escala.

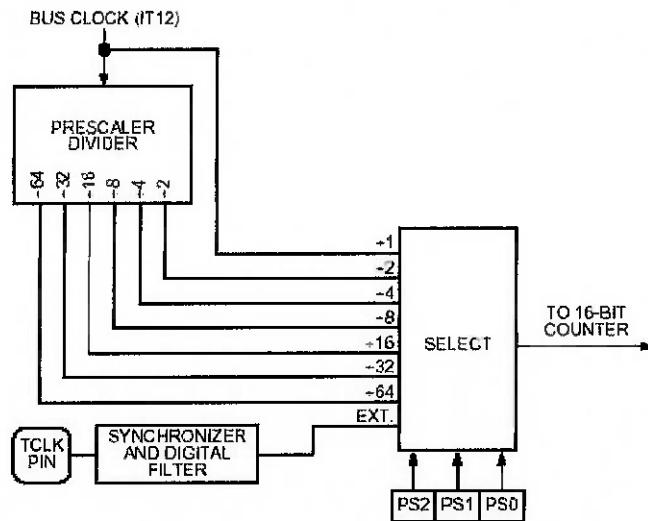


Figura 9. Esquema de funcionamento da pré-escala do contador

Assim sendo, é possível escolher a resolução desejada de contagem do tempo. A Figura 10 mostra uma tabela com um exemplo das resoluções obtidas para cada configuração de pré-escala. No caso, foi utilizado um clock externo de 32 MHz, resultado na freqüência de barramento de 8 MHz. Para este projeto, será utilizado um cristal de 20 MHz, resultando em uma freqüência no barramento de 5 MHz. A pré-escala, então, deve ser calibrada de forma que atinja a melhor resolução possível da medida e que garanta que o contador não estoure seu valor.

Prescaler	Range (Hz)	Resolution
1	122 - 8.0 M	125 ns
2	61 - 4.0 M	250 ns
4	30.5 - 2.0 M	500 ns
8	15.3 - 1.0 M	1 μ s
16	7.6 - 500 k	2 μ s
32	3.8 - 250 k	4 μ s
64	1.9 - 125 k	8 μ s

* Assumes 8 MHz bus clock, 65K counts max

Figura 10. Faixa de freqüência e resolução da contagem do timer (assumindo freqüência do barramento de 8 MHz)

3.2.5 Esquema de ligação

O diagrama de blocos da Figura 3 pode ser traduzido no esquema elétrico da Figura 11. Neste circuito vemos que o micro-controlador comanda os circuitos de potência de ultra-som e o circuito detector de eco. O potenciômetro ao pino 3 do LCD tem a função de regular o contraste do display,

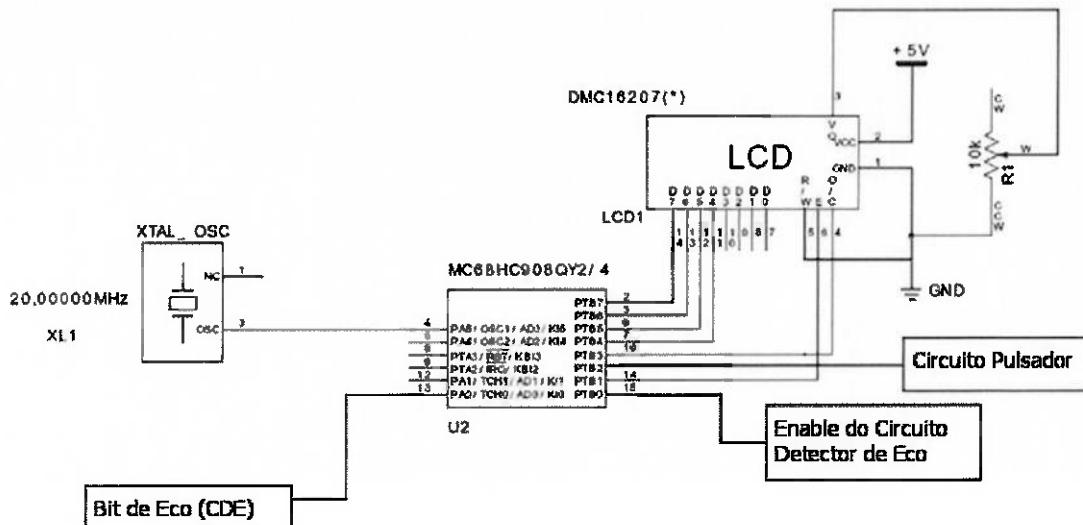


Figura 11. Esquema de ligação dos circuitos com o micro-controlador

3.3 Software de controle

O programa de controle do medidor de gordura foi implementado em linguagem Assembly para melhor controle dos tempos envolvidos nas medidas dos tempos de vôo das ondas de ultra-som.

O programa funciona da seguinte maneira: o controlador emite um pulso na saída PTB2 que dispara o circuito pulsador, que excita o transdutor de emissão. Em seguida, é dado um intervalo de tempo t1, pré-determinado por calibração. Após este período, o controlador habilita em sua saída PTB0 o circuito detector de eco, durante outro intervalo de tempo (t2), para a “procura” do eco válido. Isto porque, conhecendo todos os parâmetros do objeto a ser medido, como velocidade de

propagação e espessura mínima e máxima esperada, é possível prever em que intervalo de tempo o eco chegará ao transdutor de recepção.

Esta técnica é utilizada para evitar realizar medidas que não correspondem à espessura da camada de gordura. Isto é, os ruídos iniciais e outros ecos não serão capturados, não comprometendo a medida. A Figura 12 ilustra este procedimento. No sinal que vem do amplificador, aparecem ruídos que podem atingir o nível calibrado no detector de eco. No inicio do sinal, também pode haver interferências do pulso emitido. O micro-controlador habilita e desabilita o circuito detector de eco, recebendo o bit no instante que o eco é detectado.

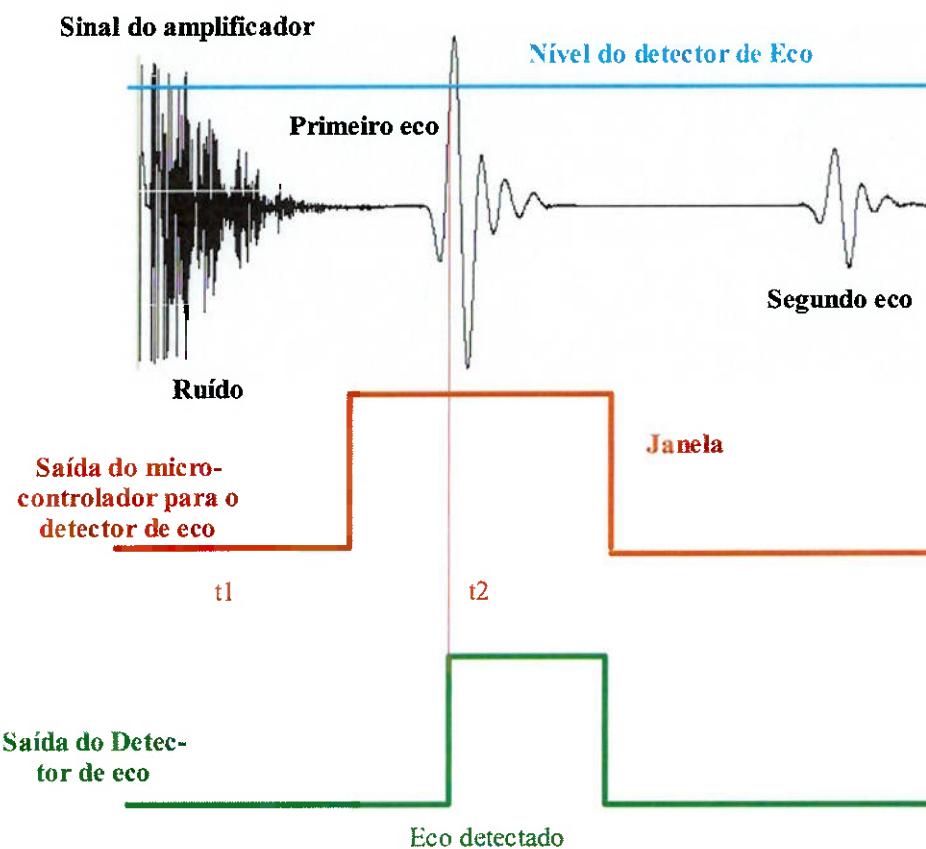


Figura 12. Janela de tempo para a procura do eco

O primeiro eco é que é considerado como sendo o eco refletido da interface mais interna da camada de gordura. Isso porque, pelo fato de ter uma espessura pequena, é possível desprezarmos a influência da pele na medição, ou mesmo eliminar através da janela, algum eco refletido na interface pele-gordura.

O diagrama de blocos (Figura 13) mostra que o programa fica em loop infinito, fazendo medidas consecutivas e imprimindo o valor zero no display quando não é detectado eco válido. Duas interrupções de timer ocorrem para os eventos de fim do tempo t_2 da janela, e chegada do eco válido. Ao fim do tempo de contagem t_2 , uma interrupção de overflow é gerada no controlador. O sinal do detector de eco para eco válido gera uma interrupção no timer 0 do controlador, que salva o tempo de contagem e o converte em escala de tempo, segundo as constantes ajustadas no programa.

O código fonte do programa é apresentado no Apêndice.

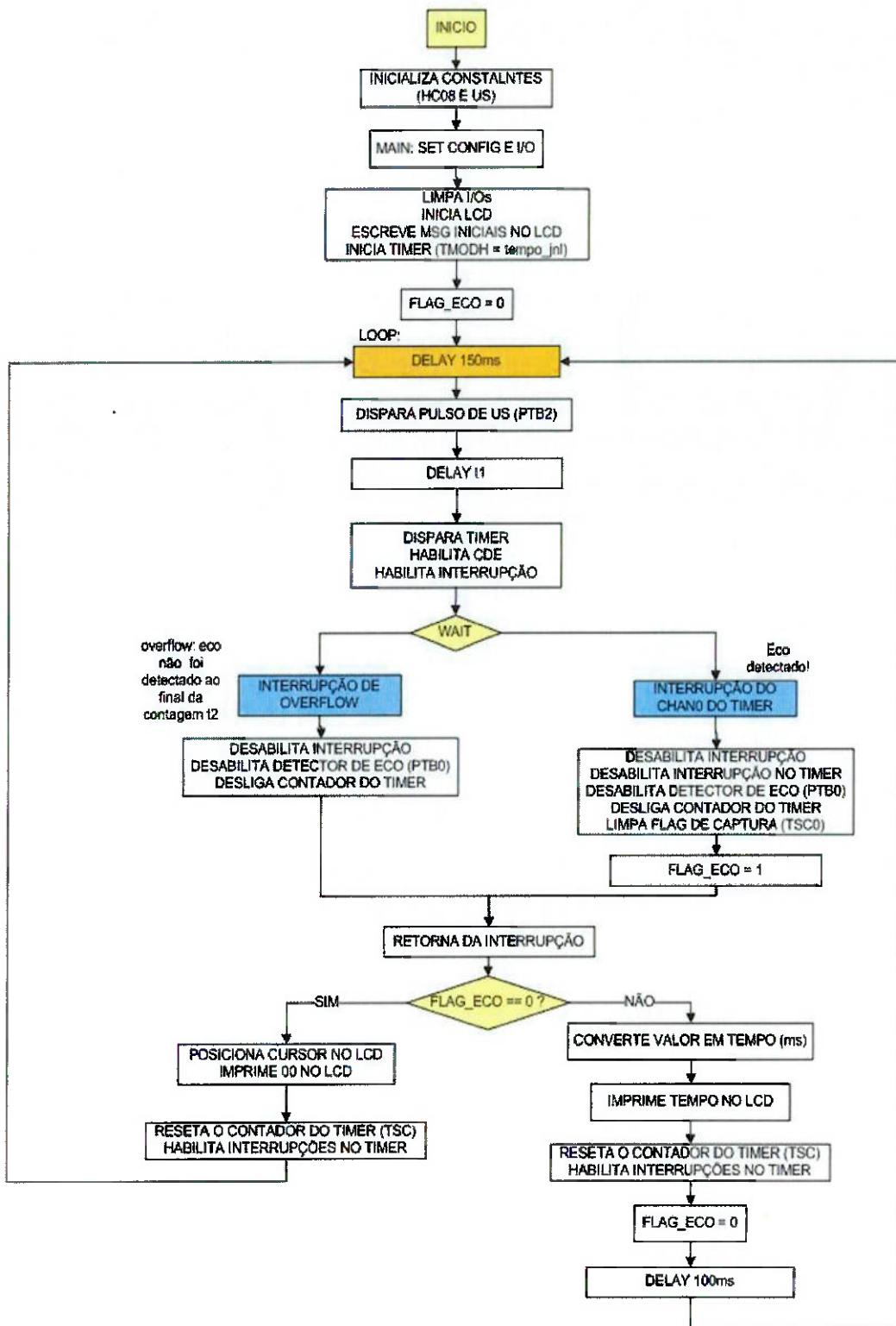


Figura 13. Diagrama de blocos do software de controle

4. SISTEMA DE CONTROLE

4.1 Configuração do micro-controlador para a aplicação em questão

4.1.1 Entradas e saídas

A Figura 14 mostra o número mínimo de pinos que serão utilizados no micro-controlador. Os pinos adicionais poderão, posteriormente, serem programados para outra funcionalidade do equipamento como RESET, entrada de dados pelo usuário, indicador de bateria baixa, etc.

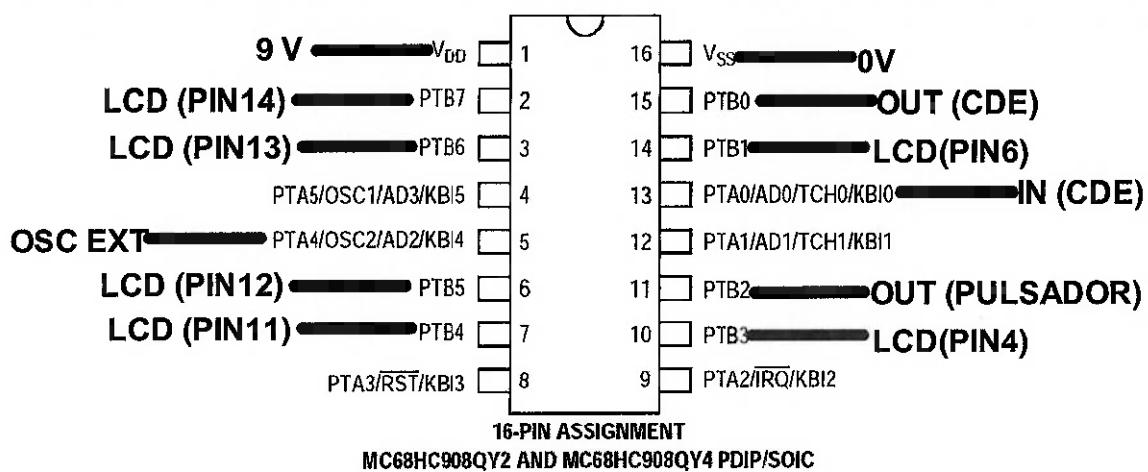


Figura 14. Funcionalidade dos pinos do chip para a aplicação em questão

Todos os pinos do PORT B (PTB) estão configurados como saída. O PTA0 está configurado como captura de entrada do contador e o pino PTA4 está configurado como entrada do oscilador externo.

Os pinos de RESET e IRQ foram propositadamente deixados livres para futuras implementações.

4.1.2 Configuração do Contador

O contador está configurado para capturar uma borda de subida na entrada PTA0 quando o timer estiver habilitado. Isso ocorrerá apenas durante a janela de tempo

quando o circuito detector de eco estiver habilitado para detectar um sinal de eco e acusar sua chegada.

Para o cálculo dos tempos necessários (t_1 e t_2 , ver Figura 12), foi feita uma análise considerando que a espessura mínima de gordura que iremos medir (desprezando a espessura da pele) é de 5 mm. Também consideramos a espessura máxima como sendo 100 mm. A espessura máxima não apresenta limitação em relação ao contador, mas sim, por motivos de atenuação da onda de ultra-som.

A Tabela I mostra os valores da velocidade de propagação do som na gordura e as espessuras consideradas para o cálculo. A Tabela II nos dá o valor da contagem do contador e a resolução da medida em milímetros.

Tabela I. Constantes do equipamento especificadas no projeto

Constantes definidas do equipamento	
Velocidade propagação (m/s) a 250	1467
Espessura mínima (mm) de gordura	5
Espessura máxima (mm) de gordura	100
Freqüência de clock (Hz)	20E+06
Freqüência do barramento (Hz)	5,00E+06
Período do clock (s)	5,00E-08
Período do clock do barramento (s)	2,00E-07
Valor máx. de Contagem	65535

Tabela II. Resolução e valores de contagem para os tempos das janelas

Pré-Escala	Resolução (mm)	Overflow (t1)		Tempo da janela (t2)	
		t1 máx p/ esp. mín (s)	valor da contagem	t2 máx p/ esp. máx (s)	tempo exato (s)
1	0,15		34	6,80E-06	681
2	0,29		17	3,40E-06	340
4	0,59		8	1,60E-06	170
8	1,17		4	0	85
16	2,35		2	0	42
32	4,69		1	0	21
64	9,39		0	0	10

Podemos concluir que, a pré-escala a ser utilizada é um, ou seja, o próprio clock do barramento. Isso porque se aumentarmos a pré-escala, o contador passará a contar mais devagar, diminuindo a resolução da medida. Além disso, para um valor de pré-escala alto, nem é possível medirmos o tempo inicial t_1 para o clock do oscilador externo.

4.1.3 Interrupções

O software implementado para o controle do equipamento utiliza as interrupções do timer para gerenciar os tempos exatos da janela de detecção do eco. Duas interrupções distintas são utilizadas: a de estouro da contagem e a de captura de entrada do timer.

A primeira é configurada para gerar uma interrupção após o período de tempo t_1 (até o valor de contagem 13 em decimal ou D em hexadecimal, ver Tabela II). Nesta interrupção o programa habilita a interrupção de captura de entrada no pino PTA0 e habilita o circuito detector de eco para, quando detectar algum sinal de eco, sinalizar para o micro-controlador.

A segunda interrupção é gerada quando o HC08 recebe uma borda de subida no pino PTA0, ou seja, o bit de eco vindo do circuito detector de eco. Nesta interrupção o sistema salva o valor da contagem, converte a medida para milímetros e imprime-a no LCD. Caso não ocorra esta interrupção até a contagem correspondente a t_2 (ver Tabela II), então outra interrupção de overflow é gerada, e tratada de forma diferente da primeira. Nesta, o programa desabilita o detector de eco e a interrupção de captura de entrada e escreve o valor zero no display. Na

Tabela III, vemos os tipos de interrupção existentes no HC08 e suas respectivas prioridades.

Tabela III. Mapa das interrupções do controlador e respectivas prioridades

Vector Priority	Vector	Address	Vector
Lowest ↑ ↓ Highest	IF15	\$FFDE	ADC conversion complete vector (high)
		\$FFDF	ADC conversion complete vector (low)
	IF14	\$FFE0	Keyboard vector (high)
		\$FFE1	Keyboard vector (low)
	IF13 ↓ IF6	—	Not used
	IF5	\$FFF2	TIM overflow vector (high)
		\$FFF3	TIM overflow vector (low)
	IF4	\$FFF4	TIM Channel 1 vector (high)
		\$FFF5	TIM Channel 1 vector (low)
	IF3	\$FFF6	TIM Channel 0 vector (high)
		\$FFF7	TIM Channel 0 vector (low)
	IF2	—	Not used
	IF1	\$FFF8	IRQ vector (high)
		\$FFF9	IRQ vector (low)
	—	\$FFFC	SWI vector (high)
	—	\$FFFD	SWI vector (low)
	—	\$FFFE	Reset vector (high)
	—	\$FFFF	Reset vector (low)

4.2 Acionamento do display

O sistema de display é utilizado para mostrar as medidas realizadas para o usuário. O display possui 2 linhas com 16 caracteres. Os endereços de cada posição no LCD podem ser vistos na Figura 15.

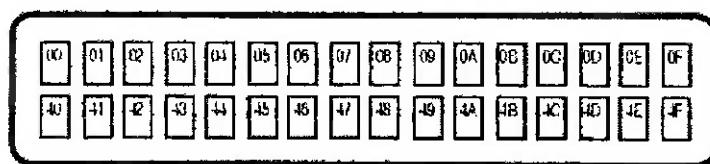


Figura 15. Matriz de caracteres do LCD

O micro-controlador se comunica com o display através de 6 pinos (4 de dados e 2 de controle). Isso porque o próprio hardware do display permite enviarmos o nibble mais significativo e o menos significativo para o display em seqüência. Desta forma, podemos poupar quatro saídas do micro-controlador sem precisar implementar registradores de deslocamento adicionais.

A Tabela IV descreve a pinagem completa do LCD. Os pinos 7 a 10, que correspondem aos bits de dados 0 a 3, não serão conectados. Apenas os pinos 11 a 14, que correspondem ao bits de dados 4 a 7, serão ligados no micro-controlador (além dos pinos de controle 4 e 6). Como não iremos fazer leitura do LCD, o pino 5 fica aterrado, exercendo a função de escrita apenas. No pino 3 foi conectado um potenciômetro para ajuste de contraste (ver Figura 11).

Tabela IV. Pinagem do LCD

Pin No.	Name	Function
1	V _{ss}	Ground
2	V _{dd}	+ve supply
3	V _{ee}	Contrast
4	RS	Register Select
5	R/W	Read/Write
6	E	Enable
7	D0	Data bit 0
8	D1	Data bit 1
9	D2	Data bit 2
10	D3	Data bit 3
11	D4	Data bit 4
12	D5	Data bit 5
13	D6	Data bit 6
14	D7	Data bit 7

Para a escrita no LCD, fez-se necessário implementar rotinas que agilizassem algumas configurações (como posicionamento do cursor e inicialização) e que convertessem um valor em binário para os códigos correspondentes à tabela de caractere do LCD (Tabela V). Algumas destas rotinas são descritas a seguir:

- **env16_dec** - converte numero BCD de 16 bits em decimal
 - **printBCD16_lcd** - imprime valores dos enderecos seg_x (321) no display
 - **print8_lcd** - imprime o valor BCD do acumulador em decimal no display
 - **disp8_lcd** - converte dado de um byte para ASCII
 - **pos_lcd** - posiciona cursor
 - **wr_byte** – escreve um byte nible a nible
 - **init_lcd** - inicializa LCD (inicio do programa)

Tabela V. Tabela de caracteres do LCD

Char. code	00000000	00000001	11111111
xxxxx0000	0@P`P	-タミ&P	
xxxxx0001	!1AQa@。アチ4äQ		
xxxxx0010	"2BRbr「イツ×βθ		
xxxxx0011	#3C5CsS」ウテモズ		
xxxxx0100	\$4DTdt、エトヲムΩ		
xxxxx0101	%5EUeu・オナユ6Ü		
xxxxx0110	&6FVfvヲカニヨρΣ		
xxxxx0111	'7Gw9wアキヌラQπ		
xxxxx1000	(8HXhxイクネリ♂X		
xxxxx1001)9IYiレフイル"4		
xxxxx1010	*:JZjエコハレiヂ		
xxxxx1011	+;K[k《オサヒロ"万		
xxxxx1100	,<L¥I ヤシフワ&円		
xxxxx1101	-=M]m)ユスヘンモ÷		
xxxxx1110	->N^m+ヨセホ"ル		
xxxxx1111	/?0_o←ソソ?ö■		

5. ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS ATRAVÉS DE ENSAIOS COM GORDURA EM LABORATÓRIO

Foram realizados testes em laboratório para estudo e estimativa de velocidade de propagação na gordura e atenuação do sinal. Para tal, foram utilizados os equipamentos do Laboratório de Ultra-som do Departamento de Engenharia Mecatrônica e Sistemas Mecânicos da Escola Politécnica da USP. O sistema para a medição consiste em um PC com placa de aquisição de sinais, um osciloscópio, um equipamento para emitir, receber e amplificar o eco, e um tanque com água (equipado com um sistema de movimentação 3D). Uma foto do laboratório com o sistema de medição do tanque é mostrada na Figura 16.



Figura 16. Foto do laboratório e do tanque com manipulador

As medidas foram feitas em uma peça de panceta (gordura suína) com dimensões 35 mm de espessura, 55 de largura e 190 de comprimento. O material utilizado pode ser visto abaixo na Figura 17.



Figura 17. Detalhe da gordura utilizada para os ensaios: peça de panceta

5.1 Medição da velocidade de propagação

A velocidade de propagação de uma onda ultra-sônica no meio pode ser calculada conhecendo-se a espessura do material e o tempo que o pulso leva para percorrer o material. No nosso caso, foram utilizados 2 transdutores, um em cada face da panceta para emissão e recepção. Outra maneira de fazer esta medida é com apenas um transdutor em modo pulso-eco para a recepção do sinal. Este modo sincroniza o disparo e recepção do transdutor, o qual emite e recebe o pulso de ultra-som. Neste caso, deve-se dividir o tempo por 2, já que o pulso percorre o dobro da distância (ida e volta).

Os parâmetros utilizados na medida foram:

- Transdutor 3.5 Mhz, 13 mm de diâmetro
- Ganho = 40 dB
- Amortecimento = 100 Ohms
- Taxa de repetição do pulsador = 200 Hz

Para a medição da velocidade de propagação, foi feita uma montagem, onde a peça era fixada lateralmente entre dois suportes a uma distância de 50 mm. O suporte serve para manter fixa a espessura a ser medida, uma vez que ao pressionar-se o

transdutor contra este material, a peça se deforma, alterando a espessura real que quer medir. Os dois transdutores, um em cada lado, foram posicionados de forma a avaliar a largura da peça. O tempo obtido foi de $32 \mu\text{s}$, o que nos dá uma velocidade de propagação de 1562 m/s. O valor da velocidade de propagação na gordura a 25°C encontrado em tabelas é de 1467 m/s.

A Figura 18 mostra o formato do sinal obtido em um dos testes feitos para a medida da espessura da peça. Nota-se no inicio do sinal o eco proveniente de uma parte não homogênea na peça de panceta.

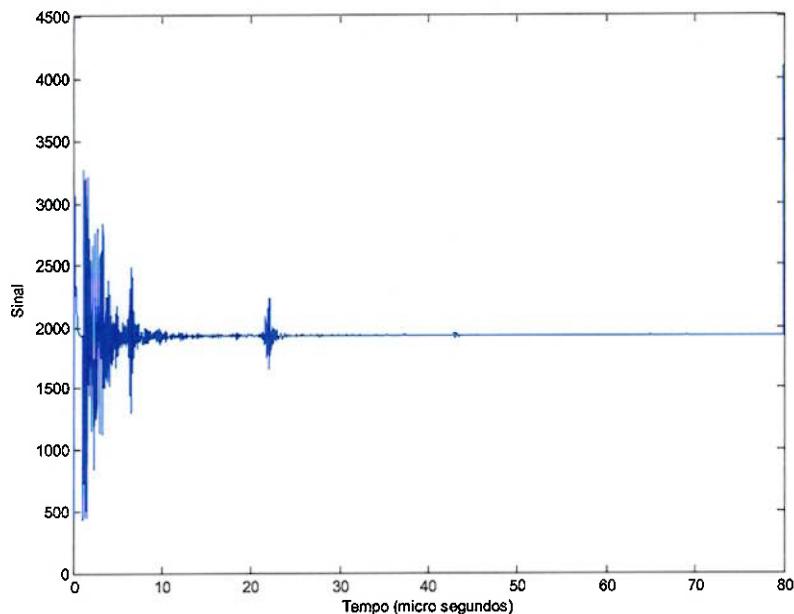


Figura 18. Exemplo do sinal obtido na medição da velocidade da peça de gordura

5.2 Medição da atenuação do sinal

A maneira utilizada para a estimativa da atenuação foi medir o ganho que o sinal do eco na gordura deveria ter, para possuir uma amplitude próxima à amplitude do sinal do eco em uma peça de alumínio. Isto porque as perdas no alumínio são muito baixas, sendo desprezadas neste caso. Assim, marcamos o nível de tensão do pico do

eco na peça de alumínio, e ajustando o ganho no amplificador, é possível chegarmos neste mesmo nível para a gordura, que possui uma atenuação considerável.

O sinal do eco capturado na medição com o alumínio pode ser visto na Figura 19. O pico do primeiro eco na escala adotada para a tensão é de 2650.

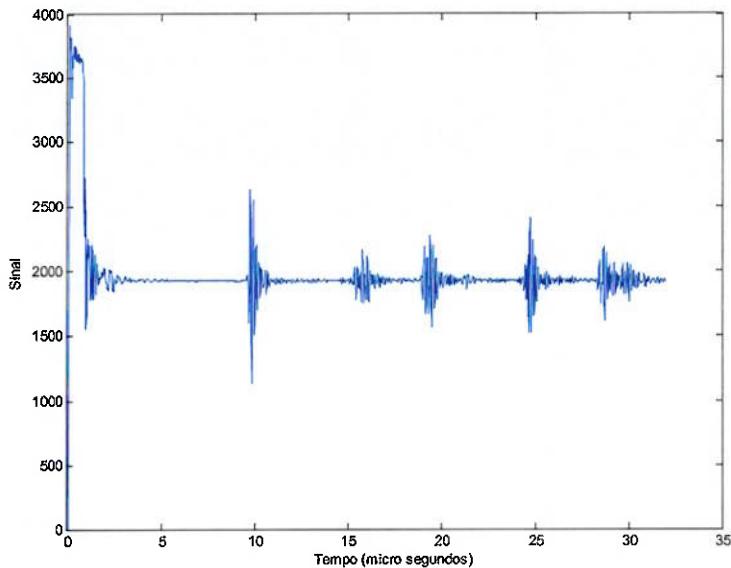


Figura 19.Sinal da medida de espessura no alumínio com 0db de ganho

Para a panceta, conseguimos atingir o mesmo nível do sinal do alumínio com 20dB de ganho. O sinal está mostrado na Figura 20. A freqüência de amostragem para ambos os casos é de 62.5 MHz. Novamente, foram utilizado transdutores de 3.5 Mhz, com 13 mm de diâmetro. Trata-se de uma freqüência de transdutor um pouco maior que 2 MHz que será utilizada no aparelho. No entanto, como a atenuação aumenta conforme a freqüência (Kino ,1987), e o amplificador selecionado tem um ganho de 28 dB ou maior, temos que o fenômeno de atenuação não será um problema.

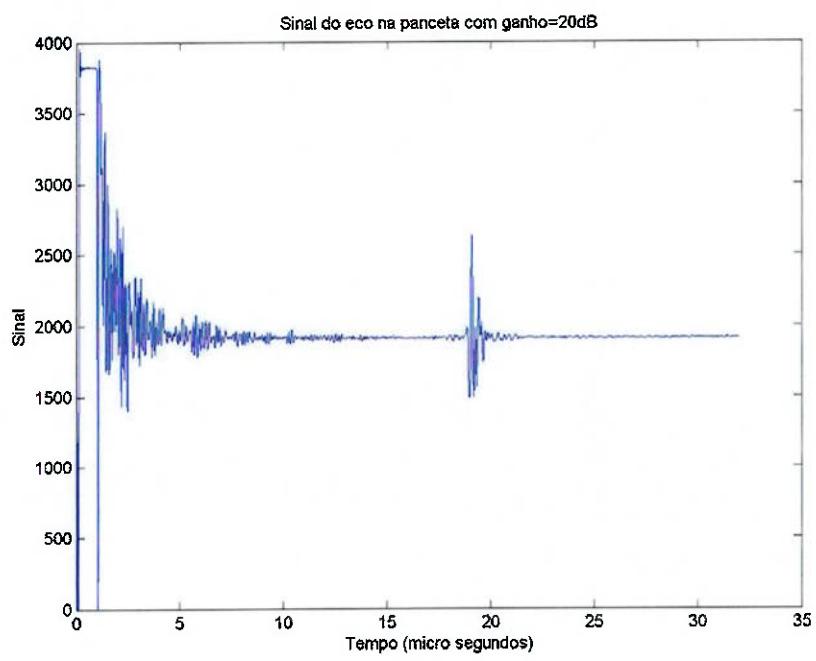


Figura 20.Eco na panceta com ganho igual a 20dB

6. CONSTRUÇÃO DO TRANSDUTOR

6.1 Conceitos envolvidos

Um transdutor é um dispositivo que converte uma forma de energia em outra. Um transdutor de ultra-som, também conhecido como cabeçote, transforma energia mecânica da propagação de uma onda no meio, em energia elétrica e vice-versa. Na transmissão, a excitação elétrica é convertida em um campo acústico; na recepção, a pressão do campo acústico é convertida em sinal elétrico.

Para a nossa aplicação, como para a maioria das aplicações de geração e detecção de ondas em sólidos ou líquidos, são utilizados transdutores piezelétricos. (Adamowski, 1993).

A piezeletricidade aparece de forma espontânea em cristais como o quartzo, ou pode ser induzida através de polarização elétrica em materiais como titanato de bário, o titanato-zirconato de chumbo (PZT), o metaniobato de chumbo (PMN) e, mais recente os polímeros a base de PVDF (polivinilidene-fluoride).

Nos transdutores, estes materiais aparecem em forma de uma placa, com eletrodos depositados em ambas as faces. Para a geração e detecção de ondas longitudinais, esta placa funciona como um resonador que irá variar sua espessura.

O transdutor piezelétrico de ultra-som consiste em um material piezelétrico e uma camada de retaguarda, cuja função é absorver a energia da onda e espalhar o pulso de ultra-som que nele se propaga. Sua principal característica é possuir um coeficiente de atenuação elevado. Isso porque o elemento piezelétrico emitirá ondas em ambas as faces, e a onda que se propagará para dentro do transdutor não poderá retornar ao material piezelétrico. Muitas vezes, também é colocado à frente do transdutor uma camada de casamento de impedância acústica, a fim de se otimizar a transmissão da energia acústica, conforme visto na Figura 21.

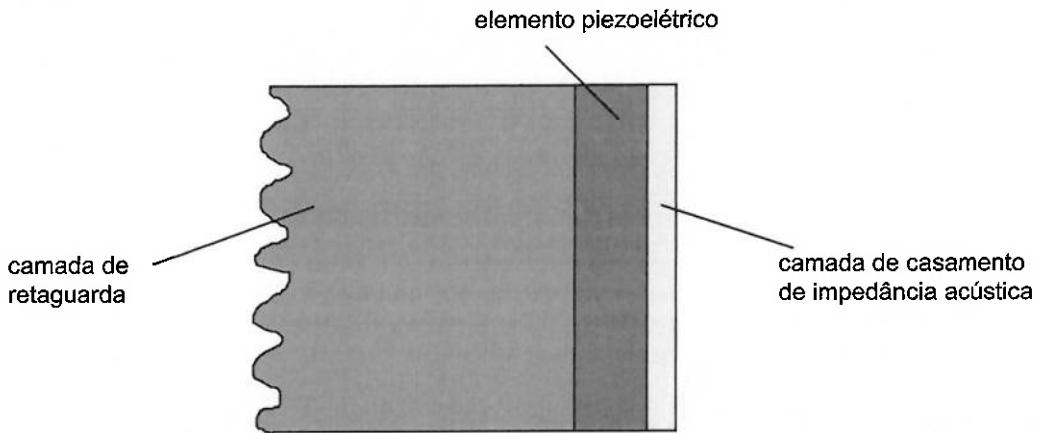


Figura 21. Esquema de um transdutor de ultra-som

A placa piezelétrica deverá ter uma das faces ligada ao terra do sinal de excitação/recepção (preferencialmente aterrada na carcaça do transdutor). A outra face deve estar soldada ao fio que irá conduzir o sinal elétrico de excitação/recepção.

6.2 Primeiros ensaios para construção do transdutor

Foram construídos diversos transdutores de maneiras diferentes para ensaios. Em todos eles, foi utilizado como elemento ativo a cerâmica piezelétrica PZT5-A, de 12,70mm de diâmetro, com freqüência de 2MHz.

A cerâmica foi colocada em um tubo de cobre, com dimensões: 15 mm de diâmetro externo, 14 mm de diâmetro interno e 25 mm de comprimento.

Devido à carcaça do transdutor ser de cobre, material condutor elétrico, foi utilizado uma composição de backing (camada de retaguarda) não condutora, a fim de se garantir a diferença de potencial elétrico entre as faces da cerâmica. Para tal, foi utilizado uma mistura de alumina e araldite, com proporção iguais em massa.

Foram montados transdutores com elemento bipartido (Figura 22) onde um elemento do transdutor é responsável pela emissão e o outro pela detecção do eco, e com um elemento simples. Estes transdutores possuem um encapsulamento único para o

emissor e o receptor, e apresentam uma menor diretividade em relação ao transdutor que construído com um único elemento inteiro.

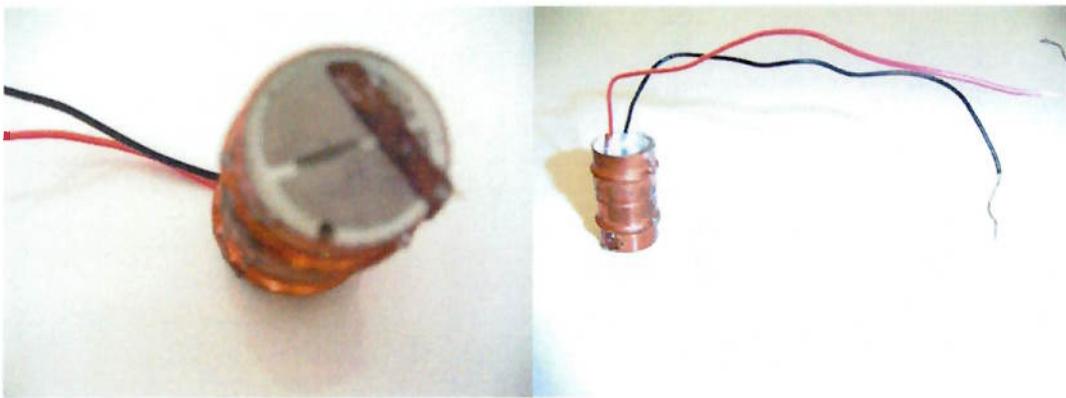


Figura 22. Foto do protótipo de transdutor construído com elemento bipartido

6.3 Construção do transdutor com cerâmica bipartida

Após os primeiros ensaios da construção do transdutor, foi feito um estudo para sua melhor adequação à aplicação desejada. Para isso, calibraramos um resistor de amortecimento no circuito pulsador para o ajuste da largura do pulso, e calculamos um indutor para ser colocado em paralelo com a cerâmica.

Este indutor, tem como principal função reduzir o efeito das vibrações laterais das cerâmicas. Isso porque, ao aplicarmos um campo elétrico, a cerâmica irá se deformar tanto na direção radial como axial (modo de espessura). Esse processo é chamado de compatibilização elétrica do transdutor, e serve para compatibilizar as impedâncias elétricas do transdutor e do hardware de emissão e recepção.

Uma forma de se calcular o valor do indutor é utilizar o modelo simplificado em que o indutor é modelado eletricamente por um resistor e capacitor, e mecanicamente por um circuito RLC. Desta forma, a compatibilização elétrica de maneira passiva é feita apenas utilizando um indutor em paralelo com o transdutor, e o valor do indutor deve ser escolhido de maneira a anular a componente reativa da impedância elétrica do transdutor, em sua frequência de ressonância. O valor da indutância pode se calculado como se segue:

$$L_0 = \frac{1}{(2\pi f_r)^2 \cdot C_0} \quad (7)$$

Onde L_0 é a indutância a ser colocada em paralelo ao transdutor, f_r é a freqüência de ressonância e C_0 é a capacitância elétrica da cerâmica.

Outra maneira de se estimar o valor do indutor é empiricamente analisando-se o sinal do transdutor. Em nosso caso, a estimação do valor do indutor foi feita utilizando indutores comerciais com valores padrão. O valor encontrado que minimiza os ruídos do transdutor que foi construído é de 18 μH .

Na construção do transdutor, alguns cuidados devem ser tomados:

- O lado positivo da cerâmica piezelétrica deve coincidir com a face frontal do transdutor, e estar aterrado com a carcaça.
- Solda-se o fio no lado negativo da cerâmica.
- Temperaturas muito altas do ferro de solda podem despolarizar a cerâmica na região de solda por aquecimento excessivo.

Optou-se também por não colocarmos uma camada de retaguarda no meio anterior à cerâmica, deixando há apenas ar. Isso foi feito com o intuito de facilitar a construção do transdutor e considerarmos o correto funcionamento deste.

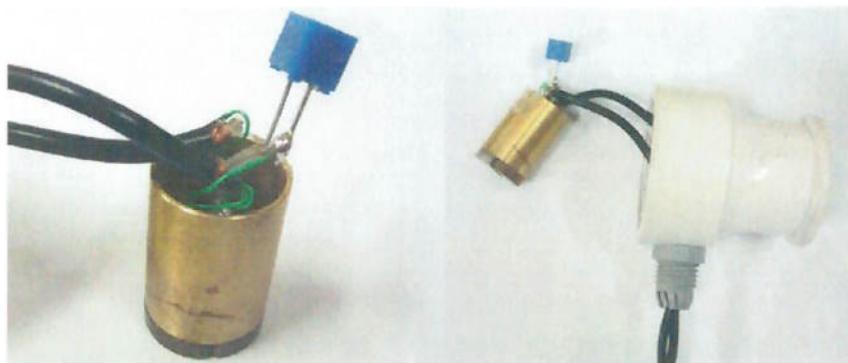


Figura 23. Foto do transdutor construído

7. RESULTADOS

As experiências realizadas com o protótipo implementado apontaram alguns pontos em que a implementação do hardware precisa ser melhorada. Conforme dito anteriormente, o equipamento desenvolvido é capaz de desempenhar a função de um medidor de espessura convencional, estando apenas calibrado para uma aplicação específica. No caso, a calibração envolve velocidade de propagação do meio, espessura máxima e mínima aceitáveis, e utilização de um transdutor de elemento bipartido operando em modo pulso-eco, que faz com que a distância percorrida pela onda seja o dobro da espessura real que será medida.

O estudo e desenvolvimento deste equipamento foram feitos de forma progressiva, de maneira que os blocos dos circuitos soldados na placa universal sem um layout pré-definido. Isso acarretou em ruídos elevados gerados pelo oscilador, fonte de alta tensão e pulsador na recepção do sinal, comprometendo a qualidade das medidas realizadas.

Com transdutores comerciais, ainda é possível fazer medidas em materiais que apresentam baixa atenuação, como acrílico ou metais. Porém, com o transdutor construído, o nível de ruído é muito elevada e não permite a correta medição da espessura.

Para medições em gordura, onde sinal do eco possui uma amplitude pequena e deve ser muito amplificado, a relação sinal/ruído é muito baixa, e a medição se torna muito difícil. Apesar disso, algumas medidas puderam ser feitas e se mostraram estáveis, no entanto, o manuseio do transdutor é bastante delicado.

Este problema pode ser contornado através da construção de um circuito impresso, desenhado de forma que os circuitos de potência e osciladores, não interfiram no circuito de amplificação do sinal e detecção do eco válido.

O transdutor construído, por sua vez, quando testado em laboratório, atende as especificações de projeto.

O software de controle, implementado em linguagem Assembly, é capaz de fazer medições precisas de tempo e controlar, de forma eficiente, a emissão e recepção dos sinais. A conversão dos valores de tempo em distância, bem como a medição dos tempos, apresentam erros de truncamento inferiores à 1 mm.

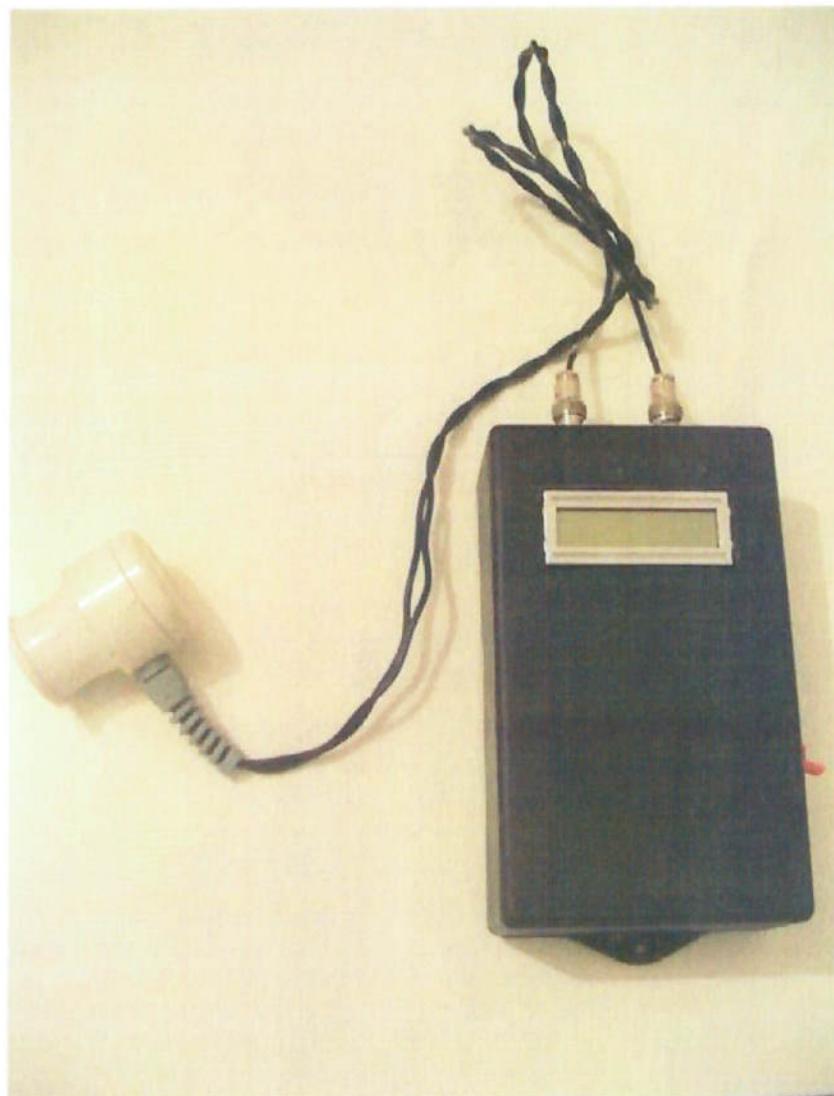


Figura 24. Foto do protótipo do equipamento

8. CONCLUSÕES

O micro-controlador da Motorola MC68HC908 se mostrou bastante eficiente e prático para a dada aplicação. Como primeira versão, o software é capaz de satisfazer os requisitos mínimos de controle do equipamento. No entanto, ainda é possível ir além em implementações de monitoração do nível da bateria, entrada de dados pelo usuário, obtenção de várias medidas para tirar-se uma média do resultado, entre outras. Isto já foi previsto no projeto inicial, onde foram reservados pinos do controlador para tais finalidades.

O transdutor implementado também apresenta um bom desempenho quando testadas suas características em laboratório. O hardware desenvolvido consegue desempenhar satisfatoriamente as funções de um medidor de espessura convencional. No entanto, pelo motivo da implementação deste em placa universal, e não em uma placa com circuito impresso, prejudicou o desempenho devido a excessivos ruídos gerados pelos circuitos de potência.

A expectativa da integração hardware-software-transdutor, atuando em conjunto para o funcionamento do equipamento, pode ser resolvida com a construção do hardware em layout adequado. E sua calibração final deve ser feita especificamente para cada aparelho, uma vez que a sensibilidade do sensor envolvido é única para cada transdutor.

LISTA DE REFERÊNCIAS

FOX, E.L., BOWERS, R.W., FOSS, M.L. **Bases Fisiológicas da Educação física dos Desportos**, Guanabara-Koogan S.A, 4 ed, Rio de Janeiro, seção 6, 1991

OLIVEIRA, F. P., **Predição de medidas ultra-sônicas para espessuras de tecido adiposo, a partir de medidas com o compasso-nomograma**, Tese de Mestrado, UFRJ, Rio de Janeiro, 1987.

BRIZZOTTI, M. A., **Modelagem de Propagação de Ondas Acústicas Emitidas e Recebidas por Transdutores Piezoelétricos**, Relatório de Iniciação Científica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

WELLS, P. N. T., **Biomedical Ultrasonics**, London, Academic Press, 1977.

MOTOROLA, **CPU08 Central Processor Unit reference Manual**, CPU08RM/AD Rev. 3, 2/2001.

MOTOROLA, **MC68HC908QY4, MC68HC908QT4, MC68HC908QY2, MC68HC908QT2, MC68HC908QY1 Data Sheet**, MC68HC908QY4/D, Rev 0.1, 12/2002.

KINSLER, L. W., et al. **Fundamentals of Acoustics**, 3rd ed., New York, Wiley, 1982.

KINO, G. S., **Acoustic Waves - Devices, Imaging and Analog Signal Processing**, Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall, 1987.

ADAMOWSKI, J. C., **Medição de Densidade de Líquidos por Ultra-som**, Tese (doutorado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

WEIGHT, J. P., **Instrumentation associated with the development of wide band ultrasonic techniques (Ultrasonic Spectroscopy)**, Master of Philosophy Thesis, The City University, London, 1975.

APÊNDICE - CÓDIGO FONTE DO PROGRAMA DO CONTROLADOR

Apêndice A - Programa principal

```

;      arquivo principal
;      Código fonte Medidor de Gordura para HC08
;

XDEF Entry,main,t_isr

Include 'qtqy_registers.inc'      ; For the QT1, QT2, QT4, QY1, QY2, QY4
Include 'constantes.inc'

;Definicoes de mensagens
;                      "1234567890123456
msg_inicio: DC.B "MedidorDeGordura",0
msg_prefor: DC.B "--- mm      ",0

;FLASH
;De $F800 A $FDFF 1536bytes
ORG $F800

_Startup:
Entry:
        ldhx #$00FF
        txs
        clrh
        sei

main:    clrxx
        lda #00001000B
        sta CONFIG2
        lda #00001001B
        sta CONFIG1

        lda #$FF
        sta PORTA
        lda #00000010B
        sta DDRA      ; configura portA
        lda #11111111B
        sta PTAPUE    ; habilita resistores de pull-up

        lda #$FF
        sta PORTB
        lda #11111111B
        sta DDRB      ; configura saidas no portB
        lda #$FF
        sta PTBPUE    ; habilita resistores de pull-up

        lda #$02      ; inicia no clock externo
        sta OSCSTAT

main_loop:

        mov #$00,PORTA
        mov #$00,PORTB

        jsr init_lcd      ;inicia LCD

        mov #$00,cnv16hi  ;registradores de conversao
        mov #$00,cnv16lo
        jsr cnv16_dec
        ldhx #$0000

```

```

        lda #$00      ; valor de a para posicionar o cursor na linha de
cima      jsr pos_lcd ; posiciona cursor no LCD

        pshx
        pshh

        ldhx #msg_inicio
        jsr wr_msg      ; escreve no LCD
        lda #$40      ; valor de a para posicionar o cursor
        jsr pos_lcd    ; posiciona cursor no LCD
        ldhx #msg_prefor
        jsr wr_msg      ; escreve no LCD

        jsr init_timer   ; inicializa TIMER
        mov    #$00,FLAG_ECO

volta_f:
        jsr dly_25ms
        jsr dly_25ms
        jsr dly_25ms
        jsr dly_25ms
        jsr dly_25ms
        jsr dly_25ms

        bset  2,PORTB    ; dispara o pulso de US
        brn *           ; delay 3 ciclos de clock
        brn *
        bclr  2,PORTB    ; descida do disparo do pulso de US

        jsr dly_6.8     ; delay de 6.8 micro-segundos

        bclr  5,TSC      ; dispara contador do TIMER
        bset  0,PORTB    ; habilita o detector de ECO
        bset  6,TSC0     ; interrupção habilitada no CHAN0
        bset  6,TSC      ; interrupção habilitada
        cli             ; habilita interrupcao
        wait            ; espera ate uma interrupcao[1]

        lda   #0
        cmp   FLAG_ECO    ; FLAG_ECO == 0?
        bne   eco_valido

        ldhx #$00      ; imprime 00 no LCD (eco nao detectado)
        sthx cnv16hi
        lda   #$44      ; posicionar o cursor

        jsr pos_lcd
        jsr cnv16_dec
        jsr printBCD16_lcd

        bset  4,TSC      ; reseta contador do timer e prescaler
        bset  6,TSC      ; interrupção habilitada
        bclr  6,TSC0     ; interrupção desabilitada no CHAN0

        jmp volta_f     ; retorno ao inicio do loop

eco_valido:
        jsr converte    ; converte contagem em tempo

        lda #$44      ; posicionar o cursor
        jsr pos_lcd
        jsr cnv16_dec

```

```

        jsr printBCD16_lcd ; imprime no LCD

        bset  4,TSC      ; reseta contador do timer e prescaler
        bclr  6,TSC0     ; interrupção desabilitada no CHAN0

        mov   #$00,FLAG_ECO

        jsr dly_25ms
        jsr dly_25ms
        jsr dly_25ms
        jsr dly_25ms

        jmp volta_f       ; retorno ao inicio do loop

        jmp main_loop

;*****
; Rotinas para LCD
;*****


;cnv16_dec - converte numero BCD de 16 bits em decimal
;cnv16hi , cnv16lo , cnv_tmp
;
cnv16_dec:
        pshx
        mov #$00,seg_03
        mov #$00,seg_02
        mov #$00,seg_01
        ldx #16

cnv16rp:
        psha
        lsl seg_03    ;*** desloca seg_03
        cic
        lsl seg_02    ;*** desloca seg_02
        tpa
        and #$01
        ora seg_03
        sta seg_03    ;contamina seg_03 se carry
        cpx #1
        beq conta16
        jsr cnv_aux  ;testa e altera byte(3) para nibbles > 5
        sta seg_03

conta16:
        lsl seg_01    ;*** desloca seg_01
        tpa
        and #$01
        ora seg_02
        sta seg_02    ;contamina seg_02 se carry
        cpx #1
        beq contb16
        jsr cnv_aux  ;testa e altera byte(2) para nibbles > 5
        sta seg_02

contb16:
        lsl cnv16hi  ;*** desloca cnv16hi
        tpa
        and #$01
        ora seg_01
        sta seg_01    ;contamina seg_01 se carry
        cpx #1
        beq contc16
        jsr cnv_aux  ;testa e altera byte(1) para nibbles > 5
        sta seg_01

contc16:
        lsl cnv16lo  ;*** desloca cnv16lo

```

```

tpa
and #$01
ora cnv16hi
sta cnv16hi ;contamina cnv16hi se carry
pula
dbnzx cnv16rp
pulx
rts
;cnv16_dec

cnv_aux:
sta cnv_tmp ;guarda valor
and #$0F ;mascara lo
cmp #05 ;compara com 5
bhs maiorq5l ;vai somar 3 se maior ou igual
bra cont_aux ;*continua se nao

maiorq5l:
lda cnv_tmp ;**
nsa ;**truque para somar sem carry
add #$30 ;**soma 3 no nibble baixo
nsa ;**truque para somar sem carry
sta cnv_tmp ;**guarda resultado
cont_aux:
lda cnv_tmp ;*carrega valor
nsa ;troca nibble
and #$0F ;mascara hi
cmp #05 ;compara com 5
bhs maiorq5h ;vai somar 3 se maior ou igual
bra final_aux;*continua se nao
maiorq5h:
lda cnv_tmp ;**carrega valor
add #$30 ;**soma 3 no nibble alto

sta cnv_tmp ;**guarda resultado
final_aux:
lda cnv_tmp ;*repoe a
term_aux:
rts
;cnv_aux

;printBCD16_lcd - imprime valores dos enderecos seg_x (321) no display
;
printBCD16_lcd:
    lda seg_03
    jsr print8_lcd
    lda seg_02
    jsr print8_lcd
    ; excluido para imprimir apenas 2 digitos
    lda seg_01
    jsr print8_lcd
    rts
;printBCD16_lcd

;print8_lcd - imprime o valor BCD do acumulador em decimal no display
; usa resultados em val16hi e val16lo
print8_lcd:
    psha
    jsr disp8_lcd
    lda val16hi
    bset rs_dis,pt_dis ;rs alto - caracteres
    jsr wr_byte
    jsr dly_2ms
    lda val16lo
    jsr wr_byte
    jsr dly_2ms
    pula
    rts
;print8_lcd

```

```

;disp8_lcd - converte dado de um byte para ASCII
; resultados em val16hi e val16lo
disp8_lcd:
    sta val8
    and #$F0
    nsa
    add #ASCII_x
    sta val16hi
    lda val8
    and #$0F
    add #ASCII_x
    sta val16lo
    lda val8
    rts

;disp8_lcd

;pos_lcd - posiciona cursor
pos_lcd:
    bclr rs_dis,pt_dis
    ora #LCD_ofs           ;adiciona offset ao endereco

    jsr wr_byte
    jsr dly_2ms
    bset rs_dis,pt_dis
    rts

;pos_lcd

;init_lcd - inicializa LCD (inicio do programa)
init_lcd:
    jsr dly_25ms
    bclr rs_dis,pt_dis ;rs baixo - comandos
    bset en_dis,pt_dis;en alto - esperando
    bclr rw_dis,pt_dis ;wr baixo - escrita
    lda #3

lcd_loop1:   psha
    lda #LCD_pre          ;pre-condicoes
    sta pt_dis
    jsr dly_2ms
    bset en_dis,pt_dis
    jsr dly_2ms
    bclr en_dis,pt_dis
    pula
    deca
    bne lcd_loop1
    lda #LCD_nib          ;primeira programacao
    sta pt_dis
    jsr dly_2ms
    bset en_dis,pt_dis
    jsr dly_2ms
    bclr en_dis,pt_dis
    lda #LCD_fix           ;fixa condicoes de uso
    jsr wr_byte            ;*** Primeira escrita em 4 bits ***
    lda #LCD_mod           ;fixa modo
    jsr wr_byte
    jsr dly_2ms
    lda #LCD_cur            ;fixa cursor
    jsr wr_byte

    bset rs_dis,pt_dis ;rs alto - caracteres
    jsr dly_2ms
    rts

;init_lcd

;wr_msg - escreve mensagem no display

```

```

wr_msg:
    lda ,X
    cbeqa #0,LCD_eost
    jsr wr_byte
    jsr dly_2ms
    aix #1
    bra wr_msg
LCD_eost:
    clra
    rts
;wr_msg
; wr_byte - escreve um byte no formato 4 bits
wr_byte:
    bclr rw_dis,pt_dis ;wr baixo
    sta chrdis           ;guarda byte
    and #$F0             ;mascara porta alta
    sta mskdis           ;escreve byte mascarado
    lda pt_dis            ;le valor atual da porta
    and #$0F              ;mascara sinalizacao
    sta nibble            ;guarda nibble
    clra                 ;apaga a
    lda mskdis           ;carrega mascara
    ora nibble            ;junta sinais com nibble

    sta pt_dis            ;escreve nibble alto
    brn wr_byte          ;*** delay de 3 ciclos ***
    bset en_dis,pt_dis   ;enable de xfer
    brn wr_byte          ;*** delay de 3 ciclos ***
    bclr en_dis,pt_dis   ;enable off
    lda chrdis            ;guarda byte
    nsa                  ;troca nibbles
    and #$F0              ;mascara porta alta
    sta mskdis           ;escreve byte mascarado
    lda pt_dis            ;le valor atual da porta
    and #$0F              ;mascara sinalizacao
    sta nibble            ;guarda nibble
    clra                 ;apaga a
    lda mskdis           ;carrega mascara
    ora nibble            ;junta sinais com nibble

    sta pt_dis            ;escreve nibble alto
    brn wr_byte          ;*** delay de 3 ciclos ***
    bset en_dis,pt_dis   ;enable de xfer
    brn wr_byte          ;*** delay de 3 ciclos ***
    bclr en_dis,pt_dis   ;enable off

    rts                  ;retorna
;wr_byte

;*****
; Rotinas para TIMER
;*****


;init_timer inicia e zera o timer
init_timer:
    lda #TSC_PS1      ;configuração TSC com pre-escala /1
    sta TSC

    lda #00000100B    ;configuração TSC0 (timer 0) rising edge
    sta TSC0          ; bit 6 -> desativado

    lda #00000000B    ;configuração TSC1 (timer 1)
    sta TSC1          ; desativado

    clr TCH0H         ; limpa os resgistradores do timer
    clr TCH0L

```

```

    clr    TCH1L
    clr    TCH1H

    pshx
    pshh

    ldhx #tempo_jnl ;valor de overflow
    sthx TMODH        ;

    pulh
    pulx

    rts

;init_timer

;converte valor da contagem em mm
converte:
    pshx
    pshh

    ldhx #VEL_SOM
    stx    AUX
    lda    AUX
    ldx    #10
    div   ; divide o valor da VEL_SOM por 10 e joga em A
    sta    AUX

    ldhx TCH0H
    stx    AUX2
    lda    AUX2
    ldx    #10
    div   ; divide o valor da contagem por 10 e joga em A

    ldx    AUX
    mul
    stx    AUX      ; bit mais signif. da multiplicacao
    sta    AUX2    ; bit menos signif da multiplicacao

    ldhx AUX

    ldx    #100
    div   ; divide o valor da contagem por 100 e joga em A

    sta    RESULT    ;joga o resultado da div em RESULT

    sthx AUX
    lda    #50
    cmp
    b1o    soma_um

    clrh
    lda    #05      ;carraga A com 5 (espessura minima)
    add    RESULT    ; soma a espessura encontrada
    sta    AUX2
    ldx    AUX2;

    sthx cnv16hi
    pulh
    pulx

    rts

soma_um:          ; soma um se o resto da divi o for maior
que 50

```

```

        clrh
        lda      #06          ;carraga A com 5 (espessura mínima)
        add      RESULT       ; soma a espessura encontrada
        sta      AUX2
        ldx      AUX2;

        sthx cnv16hi
        pulh
        pulx

        rts
; converte

;***** Rotinas para temporizacao *****
;***** Rotinas para temporizacao *****
;***** Rotinas para temporizacao *****

;dly_25ms - delay de 25ms
dly_25ms:
        pshx
        pshh
        ldhx #t20ms ;fatia de tempo
loop1:
        aix    #-1      ;[2]
        cphx  #0      ;[3]
        bne    loop1;[3]

        pulh
        pulx
        rts
;dly_25ms

;dly2ms - delay de 2ms
dly_2ms:
        pshx
        pshh
        ldhx #t2ms   ;fatia de tempo
loop1b:
        aix    #-1      ;[2]
        cphx  #0      ;[3]
        bne    loop1b ;[3]
        pulh
        pulx
        rts
;dly_2ms

;dly_6.8  delay de 6.8 micro segundo para oscilador de 20 MHz
dly_6.8:
        brn *           ; [3]
        brn *
        brn *
        brn *
        brn *
        nop
        nop
        rts            ; [4]
;dly_6.8

t_isr:
done_tisr:
        rti

;*****

```

```

; Rotinas para interrupcao
;*****



; Interrupcao por Overflow

TIM0int:
    sei                      ;desabilita interrupção [2]
    bclr  0,PORTB            ;desabilita o detector de ECO
    bset  5,TSC              ;desliga contador do TIMER [4]
    bclr  7,TSC              ; limpa flag de overflow

    rti

; Interrupcao do CHAN0 do TIMER
TIM0int:
    sei                      ; desabilita interrupção
    bclr  6,TSC0             ; interrupção desabilitada no CHAN0
    bset  5,TSC              ; desliga contador do TIMER
    bclr  0,PORTB            ; desabilita o detector de ECO
    bclr  7,TSC0              ; limpa flag de detecção de borda
    mov   #$01,FLAG_ECO

    rti                      ;[7]

;*****



; INTERRUPCOES NAO UTILIZADAS
TIM1int:
    jsr _Startup
    rti

ADCint:
    jsr _Startup
    rti

KEYint:
    jsr _Startup
    rti

IRQint:
    jsr _Startup
    rti

SWIint:
    jsr _Startup
    rti

;*****



; Vetores de interrupcao
;*****



        org $FFDE      ; (FFDE) ADC Conversion Complete
        fdb    ADCint
        org $FFE0      ; (FFE0) Keyboard Vector
        fdb    KEYint
                        ; (FFE2) Reserved
                        ; (FFE4) Reserved
                        ; (FFE6) Reserved
                        ; (FFE8) Reserved
                        ; (FFEA) Reserved
                        ; (FFEC) Reserved
                        ; (FFEE) Reserved
                        ; (FFF0) Reserved
        org $FFF2      ; (FFF2) TIM Overflow Vector
        fdb    TIM0int
;org $FFF4      ; (FFF4) TIM Channel 1 Vector
;fdb    TIM1int
        org $FFF6      ; (FFF6) TIM Channel 0 Vector
        fdb    TIM0int

```

```
; (FFF8) Reserved
org $FFFA    ; (FFFA) IRQ Vector
fdb  IRQint
org $FFFC    ; (FFFC) SWI Vector
fdb  SWIint
;org $FFFE    ; (FFFE) Reset Vector
;fdb  _Startup
END
```

Apêndice B - Constantes de acionamento de display, tempo e ultra-som

```

;arquivo constantes.inc

; CONSTANTES DE TEMPO

t50ms      EQU      31249 ;delay de 50ms em 20MHz
t25ms      EQU      15625 ;delay de 25ms
t20ms      EQU      12500 ;delay de 20ms
t15ms      EQU      9375 ;delay de 15ms
t10ms      EQU      6250 ;delay de 10ms

t2ms       EQU      1250 ;delay de 2ms
t1ms       EQU      625 ;delay de 1ms

; CONSTANTES PARA CONTROLE DO LCD

pt_dis     EQU      PORTB ;porta do nibble de barramento
rw_dis     EQU      2      ;porta do pino R/W
en_dis     EQU      1      ;porta do pino de ENABLE
rs_dis     EQU      3      ;porta do ino RS

nibble    EQU      $0081 ;mascara para o nibble
chrdis   EQU      $0082 ;armazena byte temporariamente
mskdis   EQU      $0083 ;mascara de conversao

val8      EQU      $0084 ;valor de 8 bits para display
val16hi  EQU      $0085 ;valor de 16 bits p. display (alto)
val16lo  EQU      $0086 ;valor de 16 bits p. display (baixo)

seg_01    EQU      $0087 ; 1.o end resultado HEX->Dec (1,2)
seg_02    EQU      $0088 ; 2.o end resultado HEX->Dec (2,4)
seg_03    EQU      $0089 ; 3.o end resultado HEX->Dec (5,6)
                ;          FF.FF
                ;  _._._._ seg_(321)
                ;  6 55 35

cnv16hi  EQU      $008A ; registro de conversao (alto)
cnv16lo  EQU      $008B ; registro de conversao (baixo)

cnv_tmp   EQU      $008C ; registro de operacoes temporarias de
conversao
ASCII_x   EQU      $30   ;fator de correcao para ASCII
LCD_cls   EQU      $01   ;apaga display
LCD_hme   EQU      $02   ;executa home
LCD_nib   EQU      $20   ;*** modo nibble ***

LCD_pre   EQU      $30   ;pre-condicao para a inicializacao
LCD_fix   EQU      $28   ;4bits+2linhas+matriz7*5
LCD_mod   EQU      $06   ;deslocto. cur. DIR+mensagem NAO DESLOCA
LCD_cur   EQU      $0C   ;display ativado+CURSOR desativado+blink
desativado

LCD_ofs   EQU      $80   ;primeiro endereco da DD RAM

; CONSTANTES PARA ULTRA-SOM

AUX       EQU      $008D ; variavel auxiliar da divisao
AUX2      EQU      $008E ; variavel auxiliar da divisão
RESULT   EQU      $0090 ; resultado da conversao

FLAG_ECO  EQU      $008F ; FLAG de eco válido

```

```
TSC_PS1      EQU 01100000B      ; pre-escala clock/1
VEL_SOM      EQU 1467          ; velocidade do som na gordura
tempo_jnl    EQU 667           ; 681-14 -> 13,6 mili-segundos
```

Apêndice C - Registradores do controlador

```
; arquivo qtqy_registers.inc
; Registradores do HC08
```

```
PORTE EQU $0000
PORTE EQU $0001
DDRA EQU $0004
DDRB EQU $0005
PTAPUE EQU $000B
PTBPUE EQU $000C

KBSCR EQU $001A
KBIER EQU $001B

INTSCR EQU $001D

CONFIG2 EQU $001E
CONFIG1 EQU $001F

TSC EQU $0020
TCNTH EQU $0021
TCNTL EQU $0022
TMODH EQU $0023
TMODL EQU $0024
TSC0 EQU $0025
TCH0H EQU $0026
TCH0L EQU $0027
TSC1 EQU $0028
TCH1H EQU $0029
TCH1L EQU $002A

OSCSTAT EQU $0036
OSCTRIM EQU $0038

ADSCR EQU $003C
ADR EQU $003E
ADICLK EQU $003F

BSR EQU $FE00
SRSR EQU $FE01
BRKAR EQU $FE02
BFCR EQU $FE03
INT1 EQU $FE04
INT2 EQU $FE05
INT3 EQU $FE06
FLCR EQU $FE08
BRKH EQU $FE09
BRKL EQU $FE0A
BRKSCR EQU $FE0B
LVISR EQU $FE0C
FLBPR EQU $FFBE
IOSCTRM EQU $FFC0

COPCTL EQU $FFFF
```