

LUIZ FERNANDO DORABIATO

**SISTEMA DE ULTRA-SOM PARA
CARACTERIZAÇÃO DE LEITE BOVINO**

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 grau de “Mestre em Ciências”. Área de Concentração: Engenharia Biomédica.

Orientador: Prof. Dr. Joaquim Miguel Maia

Co-Orientador: Prof. Dr. Humberto Remigio Gamba

CURITIBA

2007

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca da UTFPR – Campus Curitiba

D693s Dorabiato, Luiz Fernando
Sistema de ultra-som para caracterização de leite bovino / Luiz Fernando Dorabiato. – 2007.
122 p. : il. : 30 cm

Orientador: Joaquim Miguel Maia
Co-orientador: Humberto Remigio Gamba
Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. Área de Concentração : Engenharia Biomédica, Curitiba, 2007
Bibliografia: p. 117-20

1. Ultra-som. 2. Bovino de leite. 3. Gordura do leite. 4. Engenharia biomédica. 5. Eletrônica – Instrumentos. 6. Engenharia – Instrumentos. 7. Transdutores ultra-sônicos. I. Maia, Joaquim Miguel, orient. II. Gamba, Humberto Remigio, co-orient. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. Área de Concentração em Engenharia Biomédica. IV. Título.

CDD 621.3



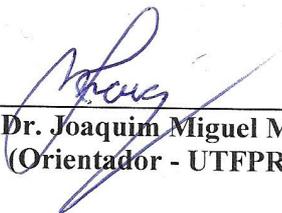
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENG^a ELÉTRICA E INFORMÁTICA INDUSTRIAL

“Sistema de Ultra-Som para Caracterização de Leite Bovino”

por

Luiz Fernando Dorabiatto

Esta Dissertação foi apresentada no dia 23 de novembro de 2007, como requisito parcial para a obtenção do grau de MESTRE EM CIÊNCIAS – Área de Concentração: Engenharia Biomédica. Aprovada pela Banca Examinadora composta pelos professores:



Prof. Dr. Joaquim Miguel Maia
(Orientador - UTFPR)



Prof. Dr. Humberto Remigio Gamba
(Co-orientador - UTFPR)



Prof. Dr. Fábio Kurt Schneider
(UTFPR)



Prof^a. Dr^a. Vera Lúcia da Silveira Nantes
Button
(Unicamp)

Visto e aprovado para impressão:



Prof. Dr. Hugo Reuters Schelin
(Coordenador do CPGEI)

*“If you're not part of the solution,
you're part of the precipitate”.*

Henry J. Tillman

AGRADECIMENTOS

A Deus.

A meus pais Antônio e Izabel e meu irmão Carlos, pelo incentivo e por acreditarem sempre no meu trabalho.

Aos Professores Dr. Joaquim Miguel Maia e Dr. Humberto Remigio Gamba, pela oportunidade, conhecimentos compartilhados e amizade adquirida nestes anos de trabalho.

Aos amigos de laboratório que participaram direta ou indiretamente no desenvolvimento deste trabalho: Alexandre Ratzke, Anderson Winkler, Arnaldo Giacomitti, Diogo Kuiaski, Fernando Gazzoni, Giselle Ferrari, Gustavo Borba, Hellen Della Justina, Henry Medeiros, Lucas Cicareli, Paulo Oliveira, Marcos Rambo, Ronie Muller, Rudnei Denis, Ulisses Pelanda e Vinícius Passini.

À Mayumi, por tornar a reta final deste trabalho um pouco mais leve.

Ao Sr. Ronaldo Piazzalunga e Sra. Lúcia Piazzalunga, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) por terem financiado o projeto.

RESUMO

DORABIATO, Luiz Fernando. Sistema de ultra-som para caracterização de leite bovino. 2007. 120 f. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Este trabalho apresenta o projeto, desenvolvimento e testes de um sistema de caracterização de leite bovino por ultra-som. Analisadores comerciais de leite bovino são utilizados em cooperativas e laticínios a fim de avaliar a qualidade do leite entregue pelos produtores. Entre as características avaliadas estão a quantidade de gorduras, extrato seco desengordurado e água adicionada ao leite. Estes índices são utilizados para estimar o rendimento da produção de laticínios e adulteração do leite. O sistema desenvolvido bombeia a amostra a ser analisada para o interior de uma célula de testes, que é aquecida a fim de fazer medições sob temperatura conhecida. Em seguida, o sistema adquire o valor da amplitude e tempo de propagação do pulso de ultra-som na amostra e relaciona estes parâmetros acústicos a valores de gorduras, extrato seco desengordurado, proteínas e água adicionada nas amostras de leite. O sistema tem boa reprodutibilidade, apresentando baixo Coeficiente de Variação (inferior a 8,8%) para análises dos componentes sólidos do leite – gorduras, proteínas e extrato seco desengordurado. Os testes de calibração apresentaram coeficientes de determinação entre os parâmetros acústicos (atenuação e velocidade de propagação) e os parâmetros a serem avaliados (teor de gordura, extrato seco desengordurado, proteínas e água adicionada) superiores a 97 % ($R^2 > 0,97$), com erros padrão de estimativa inferiores a 1,25%, indicando baixa dispersão dos dados experimentais em relação às curvas de regressão. Para avaliar o protótipo desenvolvido, foram realizados testes comparativos com equipamentos de referência. Foram utilizadas amostras de leite proveniente de um único fornecedor. Apesar do pequeno número de amostras/fornecedores avaliados, os erros percentuais absolutos máximos obtidos para as análises de componentes sólidos foram de 12,6% para gordura, 12,37% para proteínas e 13,76% para extrato seco desengordurado. Já para a quantidade de água adicionada, os erros foram superiores a 40%, no entanto estes erros deverão ser reduzidos utilizando-se um conjunto maior de amostras/fornecedores durante o processo de calibração e avaliação final do protótipo desenvolvido. Os resultados preliminares obtidos permitem concluir que o sistema de ultra-som desenvolvido é adequado para a determinação dos principais componentes do leite bovino.

Palavras-chave: Ultra-som. Leite bovino. Caracterização. Teor de gordura. Água adicionada. Instrumentação eletrônica.

ABSTRACT

DORABIATO, Luiz Fernando. Ultrasonic system for bovine milk characterization. 2007. 120 f. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

This work presents the design, development and tests of an ultrasonic milk analyzer. Milk analyzers are employed by dairy industry to evaluate the quality of acquired milk. Some of the assessed features are the fat content, solids non-fat and added water to the milk samples. These features are employed to estimate the production income of dairy products and milk adulteration. The system pumps a sample to the test cell, then the cell is warmed and the measurements are done at known temperature. Then, the system acquires the amplitude and the propagation time of the ultrasound pulse through the sample and correlates these acoustic parameters to the fat content, solids non-fat, proteins and added water in milk samples. The system showed good reproducibility, presenting low coefficient of variation (lower than 8.8%) for analysis of solid content in milk samples – fat, proteins and solids non-fat. The calibration tests presented determination coefficients between the acoustic parameters (attenuation and propagation time) and the milk components (fat content, solids non-fat, proteins and added water) higher than 97% ($R^2 > 0.97$), with standard error of estimate lower than 1.25%, showing low dispersion of the experimental data in relation to the regression curves. To evaluate the developed prototype, comparative tests in milk samples of only one supplier were carried out using the prototype and reference equipments. In spite of the small number of samples evaluated, the maximum absolute percent errors obtained for the analysis of solid content in milk were 12.6% for fat content, 12.37% for proteins and 13.76% for solids non-fat. The percent errors obtained for the amount of added water were higher than 40%, however these errors should be reduced using a higher number of samples/suppliers during the final calibration/evaluation process of the developed prototype. The preliminary results allow to conclude that the ultrasound system developed is adequate to quantify the main components of bovine milk.

Keywords: Ultrasound. Bovine milk. Characterization. Fat content. Added water. Electronic instrumentation.

LISTA DE FIGURAS

- FIGURA 1 - ANATOMIA DO ÚBERE (MODIFICADO DE QUINN, 1980 *APUD* LISHMAN, 1995). OS NÚMEROS INDICADOS 1, 2, 3 E 4 REPRESENTAM RESPECTIVAMENTE OS TETOS ANTERIOR ESQUERDO, POSTERIOR ESQUERDO, ANTERIOR DIREITO E POSTERIOR DIREITO..... 28
- FIGURA 2 - ANATOMIA DE UMA GLÂNDULA MAMÁRIA (MODIFICADO DE QUINN, 1980 *APUD* LISHMAN, 1995). 29
- FIGURA 3 - CÉLULA PARA MEDIÇÃO DE DENSIDADE DE LÍQUIDOS ATRAVÉS DO MÉTODO PULSO-ÉCO (ADAPTADO DE ADAMOWSKI *ET AL*, 1995).34
- FIGURA 4 - ONDAS LONGITUDINAIS (MODIFICADO DE KRAUTKRÄMER E KRAUTKRÄMER, 1969). 36
- FIGURA 5 - ONDAS TRANSVERSAIS (MODIFICADO DE KRAUTKRÄMER E KRAUTKRÄMER, 1969). 37
- FIGURA 6 - MÉTODO TRANSMISSÃO-RECEPÇÃO. SÃO UTILIZADOS DOIS TRANSDUTORES, UM TRANSMISSOR (T) E UM RECEPTOR (R)..... 39
- FIGURA 7 - MÉTODO PULSO-ECO. UM ÚNICO TRANSDUTOR É UTILIZADO PARA TRANSMITIR E RECEBER SINAIS ULTRA-SÔNICOS DO MEIO A SER ANALISADO. 40
- FIGURA 8 - REPRESENTAÇÃO DO CORTE LONGITUDINAL DE UM TRANSDUTOR DE ULTRA-SOM. 41
- FIGURA 9 - MODELO DE MEISSNER PARA A CÉLULA CRISTALINA DE QUARTZO (MODIFICADO DE FRADEN, 1996). 42
- FIGURA 10 - SEÇÃO LONGITUDINAL DO CAMPO ULTRA-SÔNICO PRODUZIDO POR UM TRANSDUTOR DE SEÇÃO TRANSVERSAL CIRCULAR DE RAIOS $2R$ (ADAPTADO DE FISH, 1990 E POVEY, 1997)..... 45
- FIGURA 11 - DIAGRAMA DE BLOCOS DO SISTEMA DESENVOLVIDO. O MICROCONTROLADOR ACIONA A BOMBA PERISTÁLTICA, PREENCHENDO A CÉLULA DE TESTES COM A AMOSTRA. EM SEGUIDA, APÓS A CÉLULA ATINGIR A TEMPERATURA DE TRABALHO, O CIRCUITO DE EXCITAÇÃO APLICA PULSOS NEGATIVOS NO TRANSDUTOR EMISSOR, O QUAL OS CONVERTE EM PULSOS DE ULTRA-SOM, QUE SE PROPAGAM PELA AMOSTRA, ATINGINDO O TRANSDUTOR RECEPTOR, QUE OS CONVERTE NOVAMENTE EM SINAL ELÉTRICO. ESTE SINAL É AMPLIFICADO E AMOSTRADO NO CONVERSOR ANALÓGICO-DIGITAL. O SINAL AMOSTRADO É ARMAZENADO TEMPORARIAMENTE NA FIFO E ENVIADO AO MICROCONTROLADOR QUE, A PARTIR DE EXECUÇÃO DE ALGORITMO, CALCULA OS VALORES DE AMPLITUDE E TEMPO DE PROPAGAÇÃO DO PULSO QUE SE

PROPAGOU PELA AMOSTRA. ESTES VALORES SÃO RELACIONADOS ÀS PROPRIEDADES DA AMOSTRA E MOSTRADOS NO *DISPLAY*..... 49

FIGURA 12 - CÉLULA DE TESTES.....	50
FIGURA 13 - COMPONENTES DA CÉLULA. PCI (A), PLACAS DE ACRÍLICO USINADAS (B), TUBO DE LATÃO (C) E A CERÂMICA COM FIOS SOLDADOS EM SUAS FACES (D).....	51
FIGURA 14 - SECÇÃO LONGITUDINAL DO TRANSDUTOR EMISSOR DA CÉLULA DE TESTES.....	53
FIGURA 15 - FLUXOGRAMA COM A SEQUÊNCIA DE PASSOS PARA A CONSTRUÇÃO DA CÉLULA DE TESTES.....	54
FIGURA 16 - LIGAÇÕES ENTRE MICROCONTROLADOR E <i>DISPLAY</i> DE CRISTAL LÍQUIDO.....	55
FIGURA 17 - <i>HARDWARE</i> DE CONTROLE DA IMPRESSORA.....	56
FIGURA 18 - CIRCUITO DE EXCITAÇÃO E AMPLIFICAÇÃO.....	56
FIGURA 19 - CIRCUITO DE DISPARO.....	58
FIGURA 20 - <i>DRIVER</i> DO CIRCUITO DE EXCITAÇÃO.....	58
FIGURA 21 - ESTÁGIO DE POTÊNCIA.....	59
FIGURA 22 - DIAGRAMA EM BLOCOS DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO.....	60
FIGURA 23 - AMPLIFICADOR DOS SINAIS RECEBIDOS PELO TRANSDUTOR RECEPTOR.....	61
FIGURA 24 - DIAGRAMA DE TEMPOS DO CONVERSOR ANALÓGICO-DIGITAL ADS5410 (MODIFICADO DO MANUAL DO COMPONENTE).....	62
FIGURA 25 - SISTEMA DE AQUECIMENTO.....	65
FIGURA 26 - FUNÇÃO DE SAÍDA DO SENSOR TMP37 COM RELAÇÃO À TEMPERATURA (ADAPTADO DE ANALOG DEVICES, 2006).....	66
FIGURA 27 - DIAGRAMA DE BLOCOS DO CIRCUITO DE COMANDO DA BOMBA PERISTÁLTICA.....	66
FIGURA 28 - LAÇO PRINCIPAL DO FIRMWARE.....	68
FIGURA 29 – SEQUÊNCIA DE TELAS MOSTRADAS NO DISPLAY DURANTE O AQUECIMENTO INICIAL DA CÉLULA DO PROTÓTIPO. AO SER LIGADO, O PROTÓTIPO PROCEDE AO AQUECIMENTO DA CÉLULA, MOSTRANDO NO LCD O NOME FANTASIA DO APARELHO E O PRIMEIRO SEGMENTO DA BARRA DE PROGRESSO (A). À MEDIDA QUE A CÉLULA É AQUECIDA, OUTROS SEGMENTOS SÃO IMPRESSOS NA BARRA (B) E (C).....	69

FIGURA 30 - APRESENTAÇÃO DO MENU NO <i>DISPLAY</i> DO PROTÓTIPO. MENU APRESENTADO LOGO APÓS O AQUECIMENTO INICIAL DA CÉLULA (A). AO PRESSIONAR A TECLA MENU, A OPÇÃO NATURAL SERÁ SUBLINHADA (B). PRESSIONANDO-SE NOVAMENTE A TECLA MENU, A OPÇÃO LIMPEZA SERÁ SUBLINHADA (C), E ASSIM SUCESSIVAMENTE (D).	70
FIGURA 31 - FUNÇÃO ANÁLISE DE LEITE.	71
FIGURA 32 - FUNÇÃO DE CONTROLE DA BOMBA PERISTÁLTICA.	72
FIGURA 33 - FLUXOGRAMA DA FUNÇÃO TEMPERATURA.	74
FIGURA 34 - FUNÇÃO DE AQUISIÇÃO DOS PULSOS DE ULTRA-SOM.....	76
FIGURA 35 - PULSO DE DISPARO E SINAL DE ULTRA-SOM. PD É O PULSO DE DISPARO, PUA REPRESENTA O PULSO DE ULTRA-SOM AMPLIFICADO E \overline{WEN} (<i>WRITE ENABLE</i>). T_{LP} É A LARGURA DO PULSO DE DISPARO, T_D É O PERÍODO ENTRE DOIS PULSOS DE DISPARO E T_{JA} É O PERÍODO DA JANELA DE AMOSTRAGEM.	77
FIGURA 36 - RELAÇÃO ENTRE AMPLITUDE DO SINAL DE ENTRADA E PALAVRAS DIGITALIZADAS NO CONVERSOR. DADOS OBTIDOS À TEMPERATURA AMBIENTE.	78
FIGURA 37 - FUNÇÃO ESCREVE-FIFO.....	79
FIGURA 38 - ROTINA TRANSFERE.	80
FIGURA 39 - LIGAÇÃO ENTRE FIFO E MSP430.	81
FIGURA 40 - SEQÜÊNCIA PARA MONTAGEM DAS PALAVRAS A SEREM SALVAS NO VETOR. EM (A) OS VALORES DAS PORTAS P4 E P5 SÃO LIDOS. EM SEGUIDA, OS DADOS LIDOS DE P4 SÃO MULTIPLICADOS POR UMA MÁSCARA A FIM DE ELIMINAR OS SINAIS DE WEN, RS, REN E OE (B), TENDO COMO RESULTADO O BYTE DO PASSO (C). ESTE BYTE É DESLOCADO 8 VEZES PARA A ESQUERDA (D) E SOMADO AO VALOR LIDO NA PORTA P5, RESULTANDO NA PALAVRA DE 12 BITS EM (F).	81
FIGURA 41 – RETIFICAÇÃO E IDENTIFICAÇÃO DO VALOR DE MÁXIMA AMPLITUDE DO PUA E SUA POSIÇÃO DENTRO DO VETOR AMOSTRADO. O PULSO DE ULTRA-SOM AMPLIFICADO (PUA) É AMOSTRADO PELO ADS5410, GERANDO O PULSO DE ULTRA-SOM DIGITALIZADO (PUAD).	82
FIGURA 42 - FUNÇÃO CALCULA.....	83
FIGURA 43 - UMA ANÁLISE DE LEITE NATURAL FOI ESCOLHIDA. DURANTE A ANÁLISE, UMA BARRA DE PROGRESSO INDICA O AQUECIMENTO DA AMOSTRA (A). RESULTADOS PROVENIENTES DE UMA ANÁLISE DE LEITE NATURAL (B). SÃO MOSTRADOS NO LCD O TIPO DE	

ANÁLISE (NATURAL), O ÍNDICE DA ANÁLISE (42) E OS VALORES CALCULADOS DE GORDURAS TOTAIS (G), EXTRATO SECO DESENGORDURADO (S), ÁGUA ADICIONADA (A) E PROTEÍNAS (P).84

FIGURA 44 - FUNÇÃO GUARDA-VOLUMES.....	85
FIGURA 45 - IMAGENS DO PROTÓTIPO CONSTRUÍDO.	91
FIGURA 46 - FOTO DA CÉLULA CONSTRUÍDA.	92
FIGURA 47 - DETALHE DO TRANSDUTOR EMISSOR.....	92
FIGURA 48 - PULSO DO CIRCUITO DE EXCITAÇÃO A VAZIO (A) E PULSO COM CIRCUITO LIGADO AO TRANSDUTOR EMISSOR (B).....	93
FIGURA 49 - PULSOS DE ULTRA-SOM RECEBIDOS E AMPLIFICADOS PARA A CÉLULA DE TESTES 1: SEM CAMADA DE RETAGUARDA (A) E COM CAMADA DE RETAGUARDA DE EPÓXI E ALUMINA (B).....	93
FIGURA 50 - PULSOS DE ULTRA-SOM RECEBIDOS E AMPLIFICADOS PARA A CÉLULA DE TESTES 2: SEM CAMADA DE RETAGUARDA (A) E COM CAMADA DE RETAGUARDA DE EPÓXI E ALUMINA (B).....	94
FIGURA 51 - PULSO DE ULTRA-SOM RECEBIDO E AMPLIFICADO. ESTE PULSO FOI GERADO POR UM TRANSDUTOR ONDE A CERÂMICA NÃO FOI COLADA À CAMADA DE RETAGUARDA NEM À DE COMPATIBILIZAÇÃO ACÚSTICA.....	95
FIGURA 52 - TEMPO DE PROPAGAÇÃO EM MS (A) E AMPLITUDE (B) DO PULSO DE ULTRA-SOM AO SE PROPAGAR POR AMOSTRAS DE ÁGUA.....	96
FIGURA 53 - CURVA DE COMPENSAÇÃO LEVANTADA. ESTE GRÁFICO FAZ UMA CORRELAÇÃO ENTRE A RAZÃO ENTRE OS TEMPOS DE PROPAGAÇÃO MEDIDO E REAL E A TEMPERATURA INTERNA DO PROTÓTIPO A FIM DE CORRIGIR OS ERROS NAS MEDIÇÕES DE TEMPO DE PROPAGAÇÃO DEVIDO AO AQUECIMENTO INTERNO DO EQUIPAMENTO.....	97
FIGURA 54 - VALORES DE TEMPO DE PROPAGAÇÃO (A) E AMPLITUDE (B) DOS PULSOS DE ULTRA-SOM APLICANDO-SE A CURVA DE COMPENSAÇÃO.	97
FIGURA 55 - CURVAS TRAÇADAS REPRESENTANDO A RELAÇÃO ENTRE EST E AMPLITUDE (A) E GORDURAS E AMPLITUDE DO PULSO DE ULTRA-SOM (B).....	99
FIGURA 56 - CURVAS TRAÇADAS REPRESENTANDO A RELAÇÃO ENTRE ESD E TEMPO DE PROPAGAÇÃO (A) E ÁGUA ADICIONADA E TEMPO DE PROPAGAÇÃO DO PULSO DE ULTRA-SOM (B).....	100

FIGURA 57 - CURVA TRAÇADA REPRESENTANDO A RELAÇÃO ENTRE QUANTIDADE DE PROTEÍNAS E TEMPO DE PROPAGAÇÃO DO PULSO DE ULTRA-SOM. 100

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - COMPOSIÇÃO MÉDIA DO LEITE DE VACA (SILVA ET AL, 1997).....	30
TABELA 2 - TABELA CONTENDO OS FLAGS DE STATUS DA FIFO PARA A OPERAÇÃO NO MODO PADRÃO.....	64
TABELA 3 – CONTROLE DO MOTOR.....	67
TABELA 4 - VALORES DE MÉDIA, DESVIO PADRÃO (DP) E COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (CV) PARA LEITURAS DE AMOSTRAS DE ÁGUA. AMP MEDIDO E DESLOC MEDIDO CORRESPONDEM AOS VALORES DE AMPLITUDE E TEMPO DE PROPAGAÇÃO DO PULSO DE ULTRA-SOM MEDIDOS PELO PROTÓTIPO ENQUANTO AMP REAL E DESL REAL CORREPONDEM AOS VALORES OBTIDOS DO OSCILOSCÓPIO.....	98
TABELA 5 - VALORES DE MÉDIA, DESVIO PADRÃO (DP) E COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (CV) PARA LEITURAS DE AMOSTRAS DE ÁGUA. AMP MEDIDO E DESLOC MEDIDO CORRESPONDEM AOS VALORES DE AMPLITUDE E TEMPO DE PROPAGAÇÃO DO PULSO DE ULTRA-SOM MEDIDOS PELO PROTÓTIPO ENQUANTO AMP REAL E DESL REAL CORREPONDEM AOS VALORES OBTIDOS DO OSCILOSCÓPIO.....	98
TABELA 6 - RESULTADOS OBTIDOS DE AMOSTRAS DE LEITE A PARTIR DE UM APARELHO COMERCIAL DE ANÁLISE. A COLUNA QUANTIDADE DE ÁGUA ADICIONADA SE REFERE À PORCENTAGEM DE ÁGUA ADICIONADA ÀS AMOSTRAS TESTADAS.....	101
TABELA 7 - MÉDIA PARA OS RESULTADOS DAS ANÁLISES OBTIDAS DO PROTÓTIPO.....	101
TABELA 8 – DESVIO PADRÃO PARA OS RESULTADOS DAS ANÁLISES OBTIDAS DO PROTÓTIPO.....	102
TABELA 9 – COEFICIENTE DE VARIAÇÃO PARA OS RESULTADOS DAS ANÁLISES OBTIDAS DO PROTÓTIPO.....	102
TABELA 10 – ERRO PERCENTUAL CALCULADO PARA OS RESULTADOS DAS ANÁLISES OBTIDAS DO PROTÓTIPO.....	102
TABELA A1 - SUCESSIVAS LEITURAS UTILIZANDO ÁGUA A FIM DE OBSERVAR A REPRODUTIBILIDADE DO PROTÓTIPO. A COLUNA N° CORRESPONDE AO NÚMERO DA AMOSTRA; TEMP AMOSTRA É A TEMPERATURA DA AMOSTRA INTERNAMENTE À CÉLULA; AMP MEDIDO E DESLOC MEDIDO CORRESPONDEM AOS VALORES DE AMPLITUDE E TEMPO DE PROPAGAÇÃO DO PULSO ULTRA-SOM MEDIDOS PELO PROTÓTIPO ENQUANTO AMP REAL E DESL REAL CORREPONDE AOS VALORES OBTIDOS DO OSCILOSCÓPIO; TEMP PROTÓTIPO É A TEMPERATURA INTERNA DO PROTÓTIPO, MEDIDA COM O SENSOR EMBUTIDO NO MICROPROCESSADOR E RAZÃO É O VALOR OBTIDO DA DIVISÃO ENTRE DESL REAL E DESL MEDIDO.....	111

TABELA A2 - SUCESSIVAS LEITURAS UTILIZANDO ÁGUA A FIM DE OBSERVAR A REPRODUTIBILIDADE DO PROTÓTIPO. A COLUNA N° CORRESPONDE AO NÚMERO DA AMOSTRA; TEMP AMOSTRA É A TEMPERATURA DA AMOSTRA INTERNAMENTE À CÉLULA; AMP MEDIDO E DESLOC MEDIDO CORRESPONDEM AOS VALORES DE AMPLITUDE E TEMPO DE PROPAGAÇÃO DO PULSO ULTRA-SOM MEDIDOS PELO PROTÓTIPO ENQUANTO AMP REAL E DESL REAL CORREPONDE AOS VALORES OBTIDOS DO OSCILOSCÓPIO; TEMP PROTÓTIPO É A TEMPERATURA INTERNA DO PROTÓTIPO, MEDIDA COM O SENSOR EMBUTIDO NO MICROPROCESSADOR E RAZÃO É O VALOR OBTIDO DA DIVISÃO ENTRE DESL REAL E DESL MEDIDO.112

TABELA A3 - PARÂMETROS ACÚSTICOS OBTIDOS DAS AMOSTRAS DE LEITE COM O AUXILIO DO PROTÓTIPO CONSTRUÍDO. 113

TABELA A4 - MÉDIA DOS VALORES PARA CADA TIPO DE LEITE APRESENTADO NATABELA A3. OS PARÂMETROS ACÚSTICOS FORAM MEDIDOS A PARTIR DO PROTÓTIPO CONSTRUÍDO, ENQUANTO AS CONCENTRAÇÕES DOS COMPONENTES DO LEITE FORAM OBTIDOS A PARTIR DE ANALISADORES COMERCIAIS. OS VALORES DE PORCENTAGEM DE GORDURAS, ESD E PROTEÍNAS FORAM OBTIDOS DO BENTLEY 2000 ENQUANTO A PORCENTAGEM DE ÁGUA ADICIONADA FOI OBTIDA LK-7000. 114

TABELA A5 - RESULTADOS DAS ANÁLISES FEITAS PELO PROTÓTIPO. 115

LISTA DE SIGLAS

ADC	<i>Analog-to-Digital Converter</i> (Conversor Analógico-Digital)
BPS	<i>Bits per Second</i> (Bits por Segundo)
BW	<i>Bandwidth</i> (Largura de Banda)
CA	Circuito de Aquisição
CCS	Contagem de Células Somáticas
CE	Circuito de Excitação
CI	Circuito Integrado
CML	<i>Common Mode Level</i> (Nível de Modo Comum)
CT	Célula de Testes
DDP	Diferença de Potencial
ESD	Extrato Seco Desengordurado
EST	Extrato Seco Total
FIFO	<i>Fist-In, Fist-Out</i> (Primeiro a Entrar, Primeiro a Sair)
IHM	Interface Homem-Máquina
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i> (Tela de Cristal Líquido)
NDT	<i>Nondestructive Testing</i> (Teste Não-Destrutivo)
PCI	Placa de Circuito Impresso
RAM	<i>Randon Access Memory</i> (Memória de Acesso Randômico)
RISC	<i>Reduced Instruction Set Computer</i> (Computador com Conjunto de Instruções Reduzido)
SA	Sistema de Aquecimento
SS	Sistema de Sucção
ST	Sólidos Totais
PUA	Pulso de Ultra-Som Amplificado
PVDF	<i>Polyvinylidene Difluoride</i> (Difluoreto de Polivinilideno)
PZT	<i>Lead Zirconate Titanate</i> (Titanato Zirconato de Chumbo)
TE	Transdutor Emissor
TR	Transdutor Receptor

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	25
1.1 MOTIVAÇÃO.....	25
1.2 OBJETIVO GERAL.....	26
1.3 OBJETIVO ESPECÍFICO.....	26
CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	27
2.1 LEITE	27
2.1.1 Síntese e composição do leite.....	27
2.1.2 Características físicas do leite.....	30
2.1.3 Legislação brasileira	32
2.1.4 Métodos eletrônicos de análise de líquidos por ultra-som	32
2.2 ULTRA-SOM.....	36
2.2.1 Velocidade	37
2.2.2 Atenuação	38
2.2.3 Métodos de inspeção.....	39
2.3 TRANSDUTORES DE ULTRA-SOM.....	40
2.3.1 Elemento ativo	41
2.3.2 Camada de retaguarda.....	42
2.3.3 Camada frontal.....	43
2.3.4 Campo Acústico.....	43
CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS.....	47
3.1 ARQUITETURA DO SISTEMA.....	47
3.2 CÉLULA DE TESTES	49
3.2.1 Montagem dos transdutores.....	51
3.3 DESCRIÇÃO DO HARWARE DO SISTEMA.....	54
3.3.1 Microcontrolador	54
3.3.2 Interface homem-máquina (IHM).....	55
3.3.3 Circuito de excitação do Transdutor Emissor.....	56
3.3.4 Sistema de aquisição.....	60
3.3.5 Amostragem do sinal de ultra-som.....	64
3.3.6 Sistema de aquecimento	65
3.3.7 Sistema de sucção	66
3.4 DESCRIÇÃO DO FIRMWARE	67
3.4.1 Rotina Principal	67
3.4.2 Rotina de análise de leite	70
3.4.3 Função MOTOR (Rotina de controle da bomba peristáltica).....	71
3.4.4 Função TEMPERATURA (Rotina de controle de temperatura da célula).....	72
3.4.5 Rotina de aquisição.....	75
3.4.6 Função ESCRIVE_FIFO	78
3.4.7 Função TRANSFERE.....	79
3.4.8 Função CALCULA.....	83
3.4.9 Função GUARDA VOLUMES	84
3.5 VERIFICAÇÃO DA REPRODUTIBILIDADE DO SISTEMA PARA MEDIÇÕES DE AMPLITUDE E TEMPO DE PROPAGAÇÃO DE PULSOS DE ULTRA-SOM.....	85
3.6 LEVANTAMENTO DAS CURVAS DE CALIBRAÇÃO DO PROTÓTIPO.....	87
3.6.1 Curvas de calibração para leite natural não-homogeneizado	87

3.7 COMPARAÇÃO DOS TESTES FEITOS ENTRE O SISTEMA DESENVOLVIDO E O ANALISADOR COMERCIAL.....	88
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS	91
4.1 PROTÓTIPO	91
4.2 TESTES COM AS CÉLULAS	92
4.3 VERIFICAÇÃO DA REPRODUTIBILIDADE	95
4.4 LEVANTAMENTO DAS CURVAS DE CALIBRAÇÃO PARA LEITE NÃO HOMOGENEIZADO	98
4.5 COMPARAÇÃO ENTRE AS LEITURAS DO PROTÓTIPO E DO APARELHO COMERCIAL DE TESTES	101
CAPÍTULO 5 – DISCUSSÕES E CONCLUSÕES.....	103
5.1 DISCUSSÕES	103
5.1.1 Testes com as Células.....	103
5.1.2 Reprodutibilidade do Protótipo para Leituras de Amplitude e Tempo de Propagação dos pulsos de Ultra-Som.....	104
5.1.3 Comparação entre Análises Feitas com o Protótipo e um Analisador Comercial.....	104
5.2 CONCLUSÕES	107
5.3 TRABALHOS FUTUROS	108
5.3.1 Realizar calibrações para outros líquidos	108
5.3.2 Realizar Novo Processo de Calibração.....	108
5.3.3 Construção de Uma Célula que Permita Fazer Espectroscopia por Ultra-Som.....	109

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

O leite bovino é um dos produtos fundamentais da alimentação humana e, em função disto, necessita ter sua composição constantemente monitorada. Os métodos de referência na análise do leite (testes químicos e físicos) são trabalhosos e consomem muito tempo, assim a utilização de aparelhos eletrônicos de análise torna mais dinâmico o controle da qualidade do produto entregue nos laticínios (SILVEIRA *et al.*, 2004; WINDER e WAGNER, 1979).

Não há no Brasil um regulamento específico que trata da maneira pela qual se atribuirá valor ao leite comercializado entre produtores e laticínios. No entanto, o critério mais utilizado é a contagem de células somáticas (CCS), a qual leva em conta a quantidade destas células presentes no leite por unidade de litro. Porém algumas cooperativas têm aplicado o critério da qualidade do leite entregue pelo produtor, no qual são avaliados quantidade de gorduras, proteínas, sólidos totais, extrato seco desengordurado, antibióticos e água adicionada (SBRISIA, 2005).

Através de uma avaliação cuidadosa do leite entregue, é possível detectar fraudes como a desnatação ou adição de água, e prever o rendimento na produção da indústria de laticínios (TRONCO, 2003).

Existem no mercado diversos aparelhos analisadores de leite que operam com diferentes métodos de medida: analisadores ultra-sônicos (Lactoscan, Bulltech Ekomilk), analisadores com base em absorção de raios infravermelhos (Laktron LCF-980, Miris Dairy Milk Analyzer) e analisadores que avaliam o índice crioscópico das amostras de leite (Laktron LK-7000). Alguns destes equipamentos avaliam múltiplos componentes presentes em uma amostra de leite, dentre eles quantidade de gorduras, sólidos totais, água adicionada, proteínas, lactose e densidade, enquanto outros analisam apenas um tipo de constituinte, porém com uma exatidão superior.

Aparelhos que utilizam absorção de infravermelho como princípio de operação apresentam bom desempenho, porém a custos elevados. O emprego de ultra-som tem se mostrado como uma tecnologia ainda incipiente, mas potencialmente interessante, com custos de produção mais baixos e boa exatidão nos resultados.

Técnicas de caracterização de alimentos baseadas em ultra-som têm sido amplamente utilizadas na indústria devido a sua característica não-ionizante, baixo custo, capacidade de propagar-se em meios opacos e possibilidade de realizar ensaios não-destrutivos e em linha (ADAMOWSKI *et al.*, 1995; McCLEMENTS, 1995; HIGUTI *et al.*, 1999). A fim de caracterizar um determinado material, são medidos parâmetros acústicos da amostra sob teste, os quais são correlacionados a propriedades de interesse, por exemplo, quantidade de componentes em amostras de leite.

Assim, a motivação deste trabalho está na substituição de métodos laboratoriais de análise por técnicas de caracterização por ultra-som, que permitem o desenvolvimento de equipamentos portáteis, com baixo custo e seguros, o que não é conseguido com o método tradicional. Além disso, aparelhos de análise de leite são normalmente importados, desta forma o desenvolvimento de um aparelho nacional reduziria ainda mais os custos finais do equipamento, levando a um aumento no número de estabelecimentos de processamento de leite que poderiam utilizar este tipo de equipamento, o que acarretaria em um maior controle na qualidade do leite que chegaria ao consumidor final.

1.2 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho foi o projeto, desenvolvimento e testes de um protótipo analisador de leite bovino por ultra-som, que permita a quantificação de componentes presentes em amostras deste produto.

1.3 OBJETIVO ESPECÍFICO

Desenvolver um protótipo capaz de identificar componentes presentes em amostras de leite bovino e, após devida calibração, realizar testes comparativos entre análises feitas com o protótipo e um analisador comercial de leite.

O sistema desenvolvido deverá medir quantidades de gorduras, água adicionada, proteínas e extrato seco desengordurado presentes em amostras de leite cru.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 LEITE

O leite é um líquido nutritivo branco, opaco, levemente doce, o qual é secretado pelas glândulas mamárias das fêmeas da classe dos mamíferos. Este serve como alimento para os recém-nascidos antes que estejam aptos a digerir outros tipos de alimentos (ALAIS, 1984).

Além de servir como alimento aos bezerros, o leite bovino faz parte da alimentação humana, razão pela qual é produzido em larga escala. Este é composto por uma mistura de vários componentes dispersos, emulsionados e suspensos em solução aquosa, sendo que os principais são as gorduras, proteínas, lactose e sais minerais.

Neste trabalho, sempre que for mencionado o termo “leite”, deve ser subentendido que se trata de leite bovino.

2.1.1 Síntese e composição do leite

O leite é produzido nas glândulas mamárias das fêmeas dos bovinos e é constituído por uma mistura bastante heterogênea onde são encontradas: água agindo como dispersante na solução (1), gorduras na forma globular emulsionadas na água (2), albumina e lactose na forma de solução verdadeira (3), proteínas em estado de dispersão coloidal (4) e sais minerais em solução iônica (5) (ALAIS, 1984; TRONCO, 2003).

A fim de compreender melhor a síntese de leite, é necessário conhecer um pouco a respeito da anatomia e fisiologia do úbere.

O úbere é formado por quatro glândulas mamárias, independentes entre si, chamadas tetos, indicadas na Figura 1 pelos números 1 a 4 (anterior esquerdo, posterior esquerdo, anterior direito e posterior direito, respectivamente). Os tetos 1 e 2 estão separados dos restantes por um forte ligamento central, enquanto os tetos 1 e 3 são separados dos 2 e 4 por uma fina membrana. Estas estruturas são suspensas externamente ao corpo do animal e são ricamente irrigadas por vasos sanguíneos.

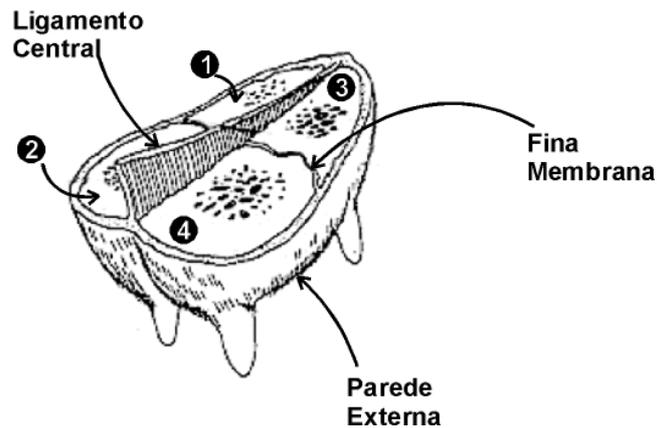


Figura 1 - Anatomia do úbere. Os números indicados 1, 2, 3 e 4 representam respectivamente os tetos anterior esquerdo, posterior esquerdo, anterior direito e posterior direito.

Fonte: Adaptado de QUINN, 1980 *apud* LISHMAN, 1995

Cada unidade do úbere é formada por milhares de estruturas denominadas lobos, os quais são envoltos por tecido conjuntivo, exercendo função de sustentação. Cada lobo é formado por diversos lóbulos, que por sua vez possuem numerosos alvéolos, que são as unidades fundamentais da produção do leite (ALAIS, 1984; TRONCO, 2003). A estrutura anatômica de uma glândula mamária pode ser observada na Figura 2.

Os alvéolos são células epiteliais modificadas que têm como função sintetizar o leite a partir do sangue que circula pelo úbere. Os hormônios responsáveis pela secreção do leite são a prolactina, o hormônio do crescimento e hormônio placentário. Tais hormônios somente atuam após o parto, com o desaparecimento dos hormônios foliculina e progesterona.

O úbere é ricamente irrigado por uma rede de capilares, alimentados pelas artérias pubianas externas. Para a produção de um litro de leite é necessária a circulação de aproximadamente 400 litros de plasma sangüíneo pelo úbere (TRONCO, 2003).

As estruturas alveolares são envoltas em tecido muscular que, sob efeito hormonal, se contraem fazendo com que o leite produzido nos alvéolos seja escoado pelos canais galactóforos em direção à cisterna do teto. O hormônio em questão, ocitocina, é liberado mediante a presença de estímulos favoráveis, tais como massagem no teto, rotina periódica de ordenha e presença do mesmo ordenhador. Estes estímulos adequados fazem com que a hipófise produza a ocitocina, que atinge as glândulas mamárias em torno de 40 segundos após os estímulos, e sua ação dura de 5 a 6 minutos (ALAIS, 1984).

De forma antagônica, estímulos inibidores levam à produção de adrenalina, o que provoca contração dos vasos sangüíneos, dificultando a chegada da ocitocina às glândulas mamárias. Tal situação ocorre quando o animal encontra-se sob estresse, devido a mudanças

na rotina de ordenha, sentimento de dor ou presença de pessoas estranhas no local (ALAIS, 1984).

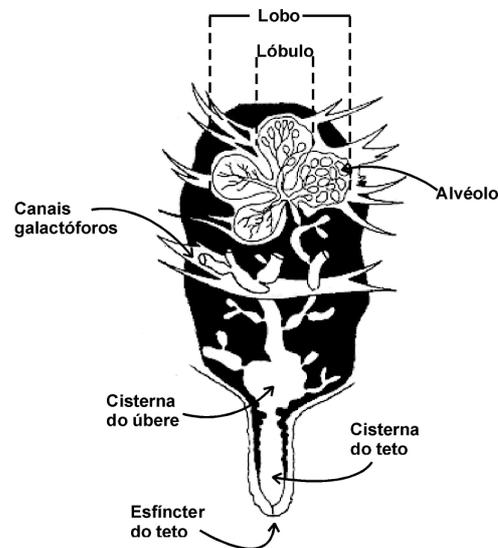


Figura 2 - Anatomia de uma glândula mamária. Fonte: Adaptado de QUINN, 1980 *apud* LISHMAN, 1995.

A lactose do leite é originada nas glândulas mamárias a partir da glicose proveniente da corrente sangüínea. Parte desta glicose sofre processo de isomerização, transformando-se em galactose, que por sua vez é ligada a outra parte da glicose extraída, formando a lactose. Também é possível sintetizar lactose a partir de ácidos graxos voláteis, porém a quantidade de lactose proveniente deste processo não passa de 10% da quantidade total (ALAIS, 1984).

Parte das gorduras presentes no leite (triglicerídeos) provém diretamente da corrente sangüínea. Outra parte é sintetizada a partir de moléculas pequenas.

A matéria protéica presente no leite é totalmente sintetizada nas mamas a partir de aminoácidos livres. Parte destes aminoácidos é retirada diretamente da corrente sangüínea, enquanto que o restante é sintetizado a partir da glicose e acetatos presentes no sangue. O componente fósforo, presente nas moléculas de caseína, tem sua origem na corrente sangüínea.

É interessante notar, que, devido a este fato, os ruminantes podem produzir leite com matéria protéica em níveis normais, mesmo sendo submetidos a uma dieta com pouca ou nenhuma proteína. Os minerais provêm diretamente do sangue.

As glândulas mamárias bovinas podem atuar também como um aparelho excretor, desta forma, substâncias estranhas tais como antibióticos, vermícidias e inseticidas podem estar presentes no leite produzido.

A Tabela 1 apresenta a composição aproximada do leite bovino (Fonte: SILVA *et al*, 1997):

Tabela 1 - Composição média do leite de vaca. Fonte: SILVA *et al*, 1997.

Constituinte	Teor (g/100ml)	Variação (g/100ml)
Água	87,30	85,5 – 88,7
Extrato seco desengordurado	8,80	7,9 – 10,0
Gordura	3,90	2,4 – 5,5
Lactose	4,60	3,8 – 5,3
Proteínas	3,25	2,3 – 4,4
Substâncias naturais	0,65	0,53 – 0,80

O termo Extrato Seco Total, EST, ou Sólidos Totais, ST, refere-se a todos os componentes constituintes do leite, com exceção da água. Retirando-se a gordura presente no EST, obtém-se o Extrato Seco Desengordurado (ESD).

2.1.2 Características físicas do leite

2.1.2.1 Propriedades ópticas

A coloração branco-opaca do leite é devida à dispersão da luz pelas micelas de caseína e glóbulos de gordura. Podem ocorrer colorações levemente amareladas, devido ao caroteno presente na gordura dos leites integrais, e levemente azuladas, nos leites desnatados (GOFF, 1995). Cores diversas podem ser devidas a desenvolvimento microbiano ou presença de sangue (ALAIS, 1984).

Métodos ópticos de análise de leite utilizam a propriedade de espalhamento de luz para quantificar os principais componentes presentes no em amostras do produto.

2.1.2.2 Densidade

A densidade do leite bovino é determinada pela quantidade de substâncias dispersas e emulsionadas presentes na solução aquosa. Valores de densidade tendem a aumentar com o

aumento da concentração de ESD e diminuir com o aumento da concentração de gorduras, já que estas possuem densidade menor que a unidade (densidade da gordura do leite: 0,94 g/ml).

A densidade média para amostras de leite de vacas domésticas fica em torno de 1,032g/ml para leite de conjunto – amostras de leite de diversas raças (ALAIS, 1984). Leites desnatados apresentam densidade um pouco superior, em torno de 1,035g/ml, devido à ausência de gordura.

A adição de água ao leite reduz sua densidade. Desta forma, uma amostra de leite desnatado adulterado com adição de água tende a apresentar densidade dentro de valores esperados para o leite integral. Assim, a medição de densidade não é adequada para a verificação de fraude por adição de água.

2.1.2.3 Ponto de congelamento

As substâncias dissolvidas no leite abaixam seu ponto de congelamento, fazendo com que este se congele a uma temperatura de $-0,55^{\circ}\text{C}$.

Esta característica é uma das mais constantes do leite, o que faz com que seja utilizada para detectar a fraude por adição de água, já que este tipo de fraude eleva o ponto de congelamento do leite (ALAIS, 1984).

2.1.2.4 Propagação de ondas ultra-sônicas

Um pulso de ultra-som, ao atravessar uma amostra de leite, pode sofrer mudanças em sua velocidade e amplitude. A velocidade do som (c) em um determinado meio depende da compressibilidade (K) e densidade (ρ) deste meio. Assim a velocidade em uma amostra de leite será afetada pelas quantidades de sólidos totais e água presentes, as quais interferem na densidade e compressibilidade do leite. A atenuação ocorre devido, basicamente, a dois processos: absorção pelo meio e espalhamento, devido aos glóbulos de gordura e proteínas presentes, sendo a gordura o principal responsável pela atenuação do ultra-som (MILES, 1990; McCLEMENTS, 1995; ALAIS, 1984). Assim, quanto maior a quantidade de gordura presente na amostra, maior será a atenuação sofrida pelo pulso de ultra-som neste meio.

FITZGERALD *et al.* (1962) mostraram que a velocidade do ultra-som no leite bovino varia com a temperatura e com a concentração de gorduras e extrato seco desengordurado presentes.

A velocidade de propagação das ondas ultra-sônicas no leite aumenta à medida que a concentração de ESD aumenta. Em relação à quantidade de gordura, se o leite estiver a uma temperatura abaixo de 16,5°C, a velocidade do ultra-som aumenta com a adição de gordura. Se a amostra estiver acima desta temperatura, a velocidade diminui com o aumento da quantidade de lipídios (FITZGERALD *et al.*, 1962).

2.1.3 Legislação brasileira

Segundo o Regulamento da Inspeção Industrial e Sanitária de Produtos de Origem Animal (RIISPOA, 1952), leite “é o produto da ordenha completa, ininterrupta, em condições de higiene, de vacas sadias, bem alimentadas e descansadas”. E considera-se normal o leite que apresenta as seguintes características:

- Características normais;
- Teor de gordura mínimo de 3%;
- Acidez em graus Dornic entre 15 e 20;
- Densidade a 15°C entre 1,028 e 1,033;
- Lactose mínima de 4,3%;
- Extrato seco mínimo desengordurado de 8,5%;
- Extrato seco total mínimo de 11,5%;
- Índice crioscópico mínimo de -0,55°C;
- Índice refratométrico no soro cúprico a 20°C não inferior a 37° Zeiss.

2.1.4 Métodos eletrônicos de análise de líquidos por ultra-som

WINDER e WAGNER (1979) propuseram um sistema para determinação de gorduras e extrato seco desengordurado em amostras de leite a partir da medição da velocidade de propagação do som. No aparato desenvolvido, duas amostras aquecidas do mesmo leite, uma

a 45°C e outra a 65°C, são atravessadas por pulsos de ultra-som através de um sistema transmissão-recepção. Os pulsos fornecidos pelo oscilador são enviados ao cristal transmissor, o qual os transforma em pulsos ultra-sônicos. Estes se propagam através da amostra de leite, excitando o cristal receptor. O pulso elétrico oriundo deste habilitará o oscilador a enviar outro pulso ao cristal transmissor. Desta forma a frequência de operação do oscilador é diretamente proporcional à velocidade do som na amostra. Este velocímetro foi proposto por LEMON *et al.* (1968). Tendo em mãos os valores das velocidades das amostras é possível calcular a concentração de gorduras totais e extrato seco desengordurado através de um sistema de equações lineares formado pelas Equações 1 e 2.

$$C_{45} = K_1(\%G) + K_2(\%ESD) + K_3 \quad (1)$$

$$C_{65} = K_4(\%G) + K_5(\%ESD) + K_6 \quad (2)$$

onde:

- C_{45} e C_{65} são as velocidades do som às temperaturas de 45°C e 65°C respectivamente;
- $\%G$ é a concentração de gorduras;
- $\%ESD$ é a concentração de extrato seco desengordurado;
- K_1 - K_6 são constantes determinadas por análises químicas tradicionais e correlacionadas empiricamente.

DION e BARWICZ (1990) propuseram um método de medição de concentração de soluções binárias (formadas por dois constituintes) através de uma célula ultra-sônica ressonante. Esta célula possui uma frequência de ressonância Fr que é função da concentração de disperso na solução e da temperatura da mesma ($Fr=[C,T]$). Desta forma, medindo-se Fr e conhecendo-se T é possível obter C , a concentração do disperso na solução.

Eles mostraram que com um controle adequado de temperatura, com variações menores de 0,005°C, é possível obter reprodutibilidade de até 0,01% para soluções binárias.

Foi implementado por ADAMOWSKI *et al.* (1995) uma célula de medição de densidade de líquidos através do método pulso-eco, apresentada na Figura 3. O dispositivo consiste de um transdutor (emissor) acoplado a uma linha de atraso 1 (LA_1), um receptor de PVDF, Linha de Atraso 2 (LA_2), compartimento para amostra líquida e refletor constituído de metal. Ambas linhas de atraso são constituídas por materiais com propriedades acústicas conhecidas.

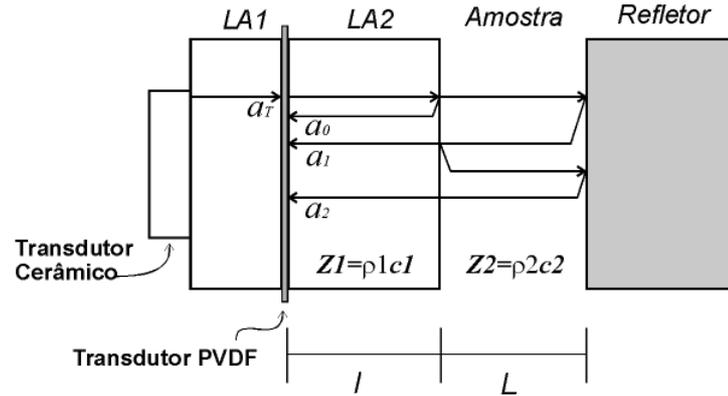


Figura 3 - Célula para medição de densidade de líquidos através do método pulso-eco.
Fonte: Adaptado de ADAMOWSKI *et al*, 1995.

A fim de encontrar a densidade do Meio 2 (amostra) é necessária a obtenção da velocidade de propagação neste meio (c_2) e sua impedância acústica Z_2 . A velocidade pode ser medida encontrando-se o tempo transcorrido entre a chegada de dois pulsos consecutivos ao receptor. Esta diferença de tempo pode ser obtida comparando-se os ecos α_0 e α_1 ou α_1 e α_2 . Neste trabalho foi utilizado o método de correlação cruzada a fim de obter a velocidade dos pulsos na amostra.

Como são conhecidas as propriedades acústicas da segunda linha de atraso, é possível encontrar o valor de Z_2 a partir do coeficiente de reflexão na interface entre LA_2 e amostra, dado pela Equação 3.

$$R_{12} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (3)$$

Desta forma, é necessário encontrar o valor de R_{12} a partir da análise dos pulsos α_0 , α_1 e α_2 , os quais são resultados de interações do pulso inicial com as interfaces LA_2 /amostra e amostra/refletor. As expressões dos sinais α_0 , α_1 e α_2 estão apresentadas a seguir.

$$\alpha_o = a_T R_{12} e^{-2\alpha_1(f_1)l} \quad (4)$$

$$a_1 = a_T T_{12} R_{23} T_{21} e^{-2\alpha_1(f_1)l} e^{-2\alpha_2(f_1)L} \quad (5)$$

$$a_2 = a_T T_{12} R_{23} R_{21} R_{23} T_{21} e^{-2\alpha_1(f_1)l} e^{-4\alpha_2(f_1)L} \quad (6)$$

Onde α_T , α_0 , α_1 e α_2 são as amplitudes dos pulsos no domínio da frequência para uma frequência f_1 , l é o comprimento da linha de atraso LA2 e L é o comprimento da amostra depositada.

A partir das relações acima, isolando-se R_{12} , encontra-se.

$$R_{12} = \left[\sqrt{\frac{A_0 A_2}{A_0 A_2 - A_1^2}} \right]_{f=f_1} \quad (7)$$

Re-arranjando a Equação 3, encontra-se a densidade da amostra.

$$\rho_2 = \frac{\rho_1 c_1 (1 + R_{12})}{c_2 (1 - R_{12})} \quad (8)$$

Também tendo em vista a caracterização de líquidos através da variação de seus parâmetros acústicos com a temperatura, PRIEV *et al.* (2005) propuseram um método de determinação da concentração de N dos componentes de uma amostra (leite, por exemplo) a partir da medição de N parâmetros acústicos e elétricos obtidos da amostra sob teste. Desta forma é possível montar um sistema de equações lineares semelhante ao proposto por WINDER e WAGNER (1979), porém contendo N variáveis e N equações, sendo N, no mínimo, igual a três.

$$V_t = K_1(\%G) + K_2(\%P) + K_3(\%L) + K_4(\%A) \quad (9)$$

$$dV/dt = K_5(\%G) + K_6(\%P) + K_7(\%L) + K_8(\%A) \quad (10)$$

$$a_t = K_9(\%G) + K_{10}(\%P) + K_{11}(\%L) + K_{12}(\%A) \quad (11)$$

$$da/dt = K_{13}(\%G) + K_{14}(\%P) + K_{15}(\%L) + K_{16}(\%A) \quad (12)$$

Neste trabalho foram medidas atenuação a uma dada temperatura (α_t), derivada da atenuação em função da temperatura (da/dt), velocidade do som a certa temperatura (V_t), derivada da velocidade do som em função da temperatura (dV/dt) e montado um sistema

linear de quatro variáveis e quatro equações. No equipamento desenvolvido também é possível a medição de um quinto parâmetro, condutividade elétrica, se for necessário.

Foram analisadas amostras de leite bovino e medidas as quantidades de gorduras, proteínas, lactose e células somáticas e os resultados obtidos apresentaram-se com bastante exatidão e muito próximos a métodos analíticos tradicionais. As constantes K_1-K_{16} foram determinadas através de métodos empíricos.

2.2 ULTRA-SOM

Devido à extensão e complexidade da teoria de ultra-som, nos próximos itens serão abordados somente tópicos necessários à compreensão deste trabalho.

Ultra-som é um tipo de onda mecânica cuja frequência situa-se acima da faixa audível do ser humano, ou seja, acima de 20kHz e é caracterizado por vibrações das partículas que constituem o material que conduz este tipo de onda sonora (CHRISTENSEN, 1988).

Ondas ultra-sônicas dividem-se basicamente em longitudinais (ou de compressão) e transversais (ou de cisalhamento). Ondas longitudinais, representadas na Figura 4, são aquelas nas quais as partículas movem-se (vibram) na mesma direção de propagação da onda, ao contrário das ondas transversais (Figura 5), cujas partículas movimentam-se ortogonalmente em relação à direção de propagação da onda.

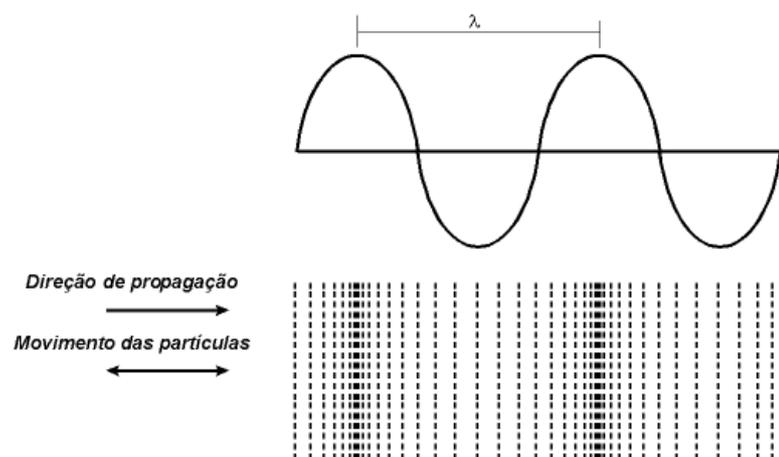


Figura 4 - Ondas longitudinais. Fonte: Adaptado de KRAUTKRÄMER e KRAUTKRÄMER, 1969.

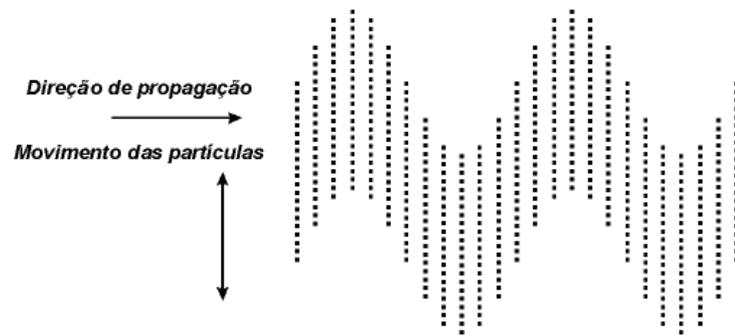


Figura 5 - Ondas transversais. Fonte: Adaptado de KRAUTKRÄMER e KRAUTKRÄMER, 1969.

2.2.1 Velocidade

A velocidade de um pulso de ultra-som que se propaga por um meio qualquer pode ser definida como o tempo gasto para que seja percorrida uma certa distância, expressa pela Equação 13.

$$c = \frac{d}{t} \quad (13)$$

onde:

- c é a velocidade da frente de onda;
- d é a distância percorrida;
- t é o tempo gasto para percorrer a distância d .

Para ondas longitudinais planas, a velocidade é dada por (CHRISTENSEN, 1988).

$$c = \frac{\omega}{k} = \frac{2\pi f}{k} \quad (14)$$

onde:

- ω é a frequência angular ($\omega = 2\pi f$);
- k é o número de onda.

A Equação de Dispersão é dada por.

$$k^2 = \rho_0 K \omega^2 \quad (15)$$

onde:

- ρ_0 é a densidade específica do material pelo qual se propaga a onda ultra-sônica;
- K é o Módulo de Young (módulo de elasticidade).

Isolando-se ω na Equação 15 e substituindo na 14, obtém-se a velocidade de um pulso de ultra-som como função da densidade e coeficiente elástico do meio pelo qual se propaga.

$$c = \frac{1}{\sqrt{\rho_0 K}} \quad (16)$$

Observando a Equação 16, nota-se que alterações na densidade e módulo de elasticidade do material sob teste mudarão a velocidade com que o sinal de ultra-som propaga-se pela amostra (CHRISTENSEN, 1988).

2.2.2 Atenuação

A intensidade de um sinal ultra-sônico decai à medida que se propaga por um meio devido a vários fatores, tais como (CHRISTENSEN, 1988):

- Divergência do sinal de ultra-som em relação ao eixo de propagação;
- Absorção pelo meio, onde parte da energia é dissipada na forma de calor, devido ao atrito entre as partículas;
- Espalhamento do sinal, devido à não homogeneidade do meio pelo qual se propaga.

Ao se propagar por uma amostra de leite, o sinal de ultra-som é atenuado principalmente devido à absorção pelo meio e ao espalhamento do sinal pelos glóbulos de gordura presentes (MILES, 1990).

Uma onda propagando-se na direção do eixo x tem sua amplitude dada por.

$$A_x = A_0 e^{-\mu_a x} \quad (17)$$

onde:

A_x é a amplitude de pico no ponto x ,

A_0 é a amplitude de pico no ponto $x=0$;

μ_a é o coeficiente de atenuação, geralmente expresso em nepers/cm, dado pela Equação 18.

$$\mu_a = -\frac{1}{x} \ln\left(\frac{A_0}{A_x}\right) = \frac{\ln(A_x) - \ln(A_0)}{x} \quad (18)$$

2.2.3 Métodos de inspeção

Ao examinar certo material é comum se utilizar de dois métodos: transmissão-recepção e pulso-eco.

2.2.3.1 Transmissão-recepção

Esta técnica utiliza dois transdutores de ultra-som, sendo que um exerce a função de transmissor enquanto o outro atua como receptor. Neste método um pulso elétrico é aplicado ao transdutor transmissor, o qual o converte em uma onda ultra-sônica que se propaga em direção ao segundo transdutor (receptor). Este converte o pulso de ultra-som em sinal elétrico. Neste método é possível transmitir/receber ultra-som tanto no modo pulsado como no contínuo.

A Figura 6 ilustra tal arranjo.



Figura 6 - Método transmissão-recepção. São utilizados dois transdutores, um transmissor (T) e um receptor (R).

2.2.3.2 Pulso-eco

Este método emprega apenas um transdutor utilizado tanto para transmitir quanto para receber o sinal ultra-sônico. Deste modo, um pulso elétrico é aplicado no transdutor que o converte em sinal de ultra-som. A onda gerada propaga-se pelo Meio 1. Ao encontrar uma interface (neste caso entre os meios 1 e 2, vide Figura 7) parte do sinal é refletido e parte continua a se propagar pelo Meio 2. Ao encontrar outra interface, o pulso novamente sofre transmissão e reflexão e assim por diante. Os ecos gerados pelas interações entre o pulso inicial e as interfaces serão detectados pelo transdutor, atuando agora como receptor. Este método permite apenas a utilização de ultra-som pulsado.

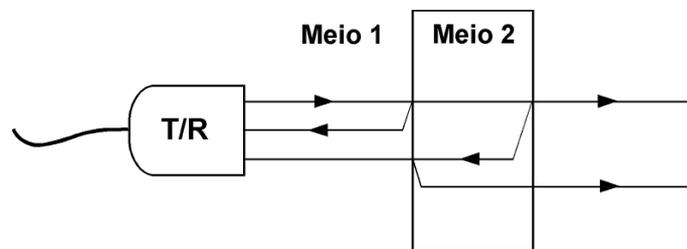


Figura 7 - Método pulso-eco. Um único transdutor é utilizado para transmitir e receber sinais ultra-sônicos do meio a ser analisado.

2.3 TRANSDUTORES DE ULTRA-SOM

O transdutor ultra-sônico é o principal componente de um sistema de testes de materiais por ultra-som. Este dispositivo é responsável por transformar os sinais elétricos gerados pelo equipamento de testes em ondas ultra-sônicas, e receber os ecos que se propagaram pelo material sob testes, transformando-os novamente em sinais elétricos.

Um transdutor deve apresentar boa resistência mecânica, alta eficiência como transmissor e alta sensibilidade como receptor. Diversos parâmetros influenciam diretamente no desempenho de um transdutor e vão desde a escolha dos materiais utilizados até a forma como são dispostos os elementos durante a confecção do transdutor (WELLS, 1999; NASCIMENTO, 2003).

A Figura 8 traz uma representação esquemática de um transdutor de ultra-som e seus principais componentes.

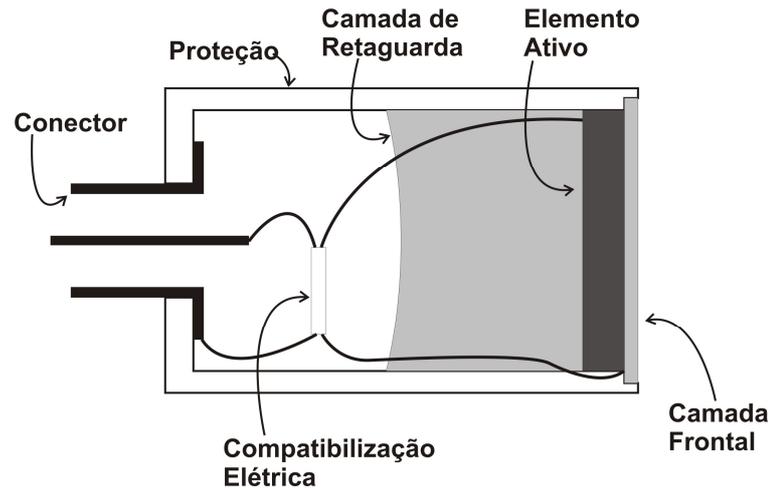


Figura 8 - Representação do corte longitudinal de um transdutor de ultra-som.

2.3.1 Elemento ativo

O elemento ativo é o componente responsável por transformar sinais elétricos em ondas ultra-sônicas, operando como transmissor, ou ultra-som em sinal elétrico, enquanto receptor.

Esta transformação de eletricidade em ultra-som, e vice-versa, é possível graças ao fenômeno da piezoelectricidade, apresentado por alguns materiais como quartzo, cerâmicas cristalinas e polímeros.

Materiais piezoelétricos podem desenvolver tensão elétrica quando submetidos a uma deformação mecânica ou vice-versa. Este fenômeno é conhecido como efeito piezoelétrico e foi descoberto pelos irmãos Curie em 1880.

Meissner propôs, em 1927, um modelo simplificado para explicar o efeito piezoelétrico. Neste modelo cada célula cristalina de quartzo é formada por três átomos de Silício (Si) e seis átomos de Oxigênio (O) num arranjo alternado entre Si e O₂, como pode ser visto na Figura 9 (MEISSNER, 1927 *apud* FRADEN, 1996).

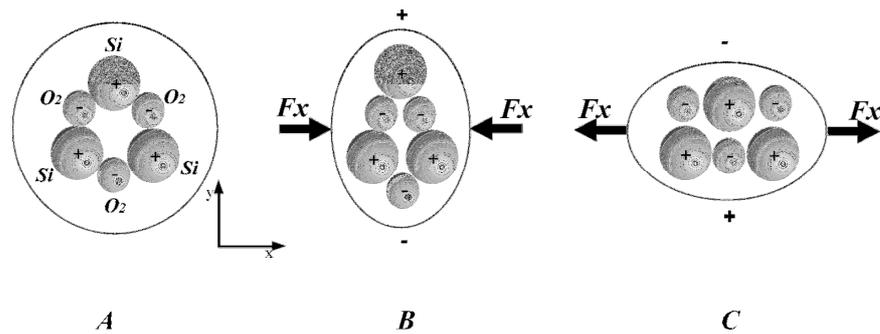


Figura 9 - Modelo de Meissner para a célula cristalina de quartzo. Fonte: Adaptado de FRADEN, 1996.

Como cada átomo de Si apresenta quatro cargas positivas e cada molécula de O₂ possui quatro cargas negativas esta célula cristalina se apresenta eletricamente neutra quando nenhuma força é aplicada sobre ela (Figura 9A). Quando uma força de compressão F_x é aplicada sobre a célula, a configuração inicial é deformada e há geração de diferença de potencial ao longo do eixo y (Figura 9B).

De modo contrário, se a força aplicada for de tração haverá uma deformação diferente à primeira gerando DDP de polaridade inversa ao primeiro caso (Figura 9C).

O efeito piezoelétrico também ocorre de maneira inversa à apresentada anteriormente: se for aplicada uma diferença de potencial entre as faces de um disco de material piezoelétrico na direção do eixo y ocorrerão deformações no eixo x, dependendo da polaridade da DDP aplicada.

2.3.2 Camada de retaguarda

Esta camada é utilizada com o fim de proporcionar suporte mecânico ao transdutor, garantir a máxima eficiência no acoplamento eletromecânico e reduzir a reverberação.

A camada de retaguarda deve ser confeccionada em um material que apresente impedância acústica semelhante à do elemento ativo e que absorva os pulsos de ultra-som que são emitidos pela face posterior deste (NGUYEN *et al*, 1996).

Geralmente a camada de retaguarda é produzida a partir de uma mistura de epóxi com óxido de alumínio, também chamado alumina, epóxi com pó de tungstênio, ou outros materiais que apresentem elevado índice de atenuação acústica.

2.3.3 Camada frontal

Esta camada tem como função aumentar a eficiência de transmissão de energia acústica do transdutor para o meio sob teste além de proteger o elemento ativo do meio externo. A impedância acústica de uma cerâmica piezoelétrica fabricada em PZT (Titanato Zirconato de Chumbo) é de aproximadamente $30,8 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$ (ONDA CORPORATION, 2003), enquanto que meios biológicos, em geral, apresentam impedância em torno de $1,6 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$ (MAIA, 2001 *apud* BRONZINO, 1986). Desta forma, devido à grande diferença entre estas impedâncias, o transdutor apresentará baixa eficiência, já que boa parte do sinal proveniente da cerâmica, ao encontrar a interface cerâmica/material sob teste, será refletido novamente para o elemento ativo.

Com o intuito de melhorar a transferência de energia, é utilizada uma camada de compatibilização acústica (*Matching Layer*) entre o elemento ativo e o material sob teste, com impedância intermediária entre ambos.

O dimensionamento da camada de compatibilização que permita a máxima transferência de energia acústica do transdutor para o material a ser analisado é dada pela Equação 19 (CHRISTENSEN, 1988).

$$Z_C = \sqrt{Z_T \cdot Z_M} \quad (19)$$

Onde:

- Z_C é a impedância acústica da camada de compatibilização;
- Z_T é a impedância acústica do elemento ativo;
- Z_M é a impedância acústica do material a ser testado.

2.3.4 Campo Acústico

Um transdutor com secção transversal circular produz um campo ultra-sônico como apresentado na Figura 10. O campo ultra-sônico gerado pode ser dividido em Região de Campo Próximo (ou Região de Fresnel) e Região de Campo Distante (ou Região de Fraunhofer). Na Região de Fresnel não há divergência do campo, porém, devido à interação entre ondas planas e ondas de borda geradas (que podem ter fases e amplitudes diferentes), são causadas

interferências construtivas e destrutivas, produzindo uma sucessão de pontos de máximo e mínimo na intensidade do campo nesta região.

A diferença de fase e amplitude entre as ondas planas e de borda na Região de Fraunhofer é desprezível; desta forma, estas ondas interagem construtivamente entre si, formando uma frente de onda aproximadamente plana, que é atenuada à medida que se propaga pelo meio, na direção do eixo longitudinal do transdutor (FISH, 1990).

Na Figura 10 está representado o campo ultra-sônico gerado por um transdutor com face circular de diâmetro $2R$ e o ponto de separação entre as duas regiões do campo. ZEMANEK (1971) mostrou que a distância entre a face do transdutor e o ponto de separação entre os campos é dada por.

$$Z = \frac{0,75R^2}{\lambda} \quad (20)$$

onde:

- Z é a distância entre a face do transdutor e o ponto de separação entre os campos;
- R é o raio da face do transdutor;
- λ e o comprimento de onda do sinal gerado.

O ângulo de divergência do feixe ultra-sônico na região de campo distante é dado por.

$$\theta = \text{sen}^{-1}\left(0,61\frac{\lambda}{R}\right) \quad (21)$$

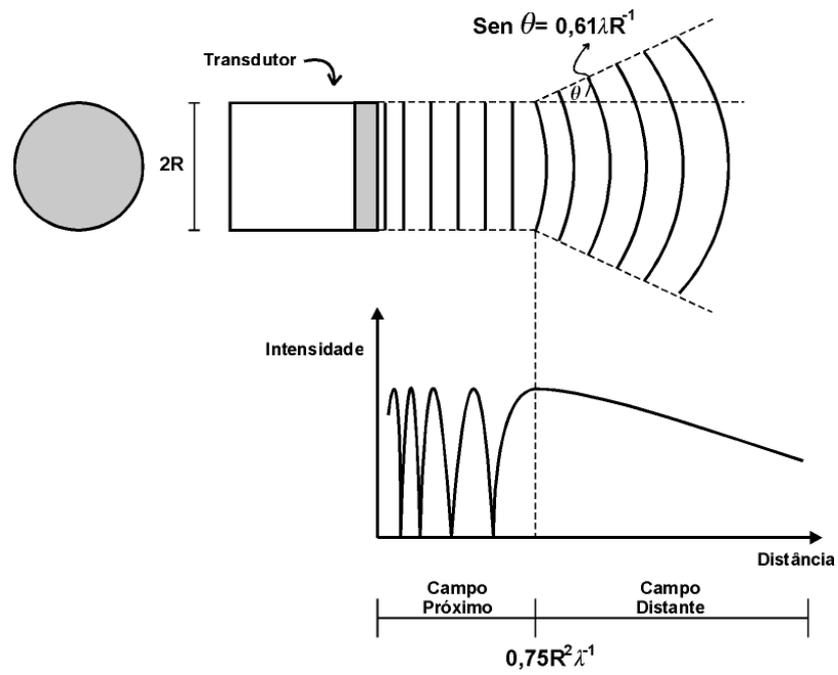


Figura 10 - Seção longitudinal do campo ultra-sônico produzido por um transdutor de secção transversal circular de raio $2R$. Fonte: Adaptado de FISH, 1990 e POVEY, 1997.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo apresenta-se o protótipo de um novo aparelho caracterizador de leite por ultra-som. São abordados o diagrama em blocos do sistema eletrônico e o seu funcionamento, além da descrição do algoritmo de controle.

3.1 ARQUITETURA DO SISTEMA

A caracterização de um líquido por ultra-som é realizada através da medição de parâmetros acústicos do material sob teste. Valores medidos de velocidade e amplitude do pulso ultra-sônico que atravessa a amostra podem ser correlacionados a propriedades como densidade e concentração de solutos em soluções.

No entanto, o sistema deve fazer a medição destes parâmetros sob temperatura controlada, já que variações na temperatura do material influenciam diretamente na medição dos parâmetros acústicos (WINDER e WAGNER, 1979).

O sistema elaborado é apresentado no diagrama de blocos da Figura 11. O protótipo é composto por sete blocos funcionais: Microcontrolador (μ C), Célula de Testes (CT), Circuito de Excitação (CE), Circuito de Aquisição (CA), Interface Homem-Máquina (IHM), Sistema de Sucção (SS) e Sistema de Aquecimento (SA).

O Microcontrolador é responsável por gerenciar todas as atividades relacionadas ao acondicionamento e análise da amostra: Ao ligar o protótipo, a CT é pré-aquecida até 43°C. Em seguida, ao proceder a uma análise, a bomba é acionada criando-se uma diferença de pressão no sistema, o que tem como consequência o preenchimento da célula e mangueiras até o ponto A, indicado na Figura 11. É importante salientar que a célula fica inclinada com a intenção de facilitar a saída de eventuais bolhas de ar que possam surgir durante a sucção. No próximo passo, a célula de testes entra em processo de aquecimento. Após a célula atingir a temperatura de trabalho, o Circuito de Excitação aplica pulsos elétricos negativos no Transdutor Emissor (TE) da célula, os quais são convertidos em pulsos ultra-sônicos, que percorrem a amostra e atingem o Transdutor Receptor (TR), sendo convertidos novamente em sinal elétrico e amplificados.

O Pulso de Ultra-som Amplificado (PUA) é digitalizado e armazenado temporariamente no Circuito de Aquisição e, em seguida, enviado ao Microcontrolador que, através de algoritmo, encontra os valores da amplitude em mV e tempo de propagação em μ s deste pulso. Estes valores são correlacionados aos componentes do leite: Concentração de Gorduras, ESD, Proteínas e Água Adicionada.

Depois de calculados, os valores de interesse são mostrados no *display*, salvos na memória *flash* do Microcontrolador e em seguida, a bomba é acionada novamente, no sentido oposto, fazendo com que a amostra seja ejetada da célula.

A Interface Homem-Máquina é feita através de um teclado, um *display* LCD e uma mini-impressora matricial, que se comunica com o protótipo através do protocolo RS-232. Depois de inicializado, são apresentadas no *display* as opções de análise do aparelho e, a partir do teclado, o usuário pode escolher qual operação o protótipo deve realizar. Depois de realizada uma análise, os resultados podem ser mostrados no *display* ou impressos.

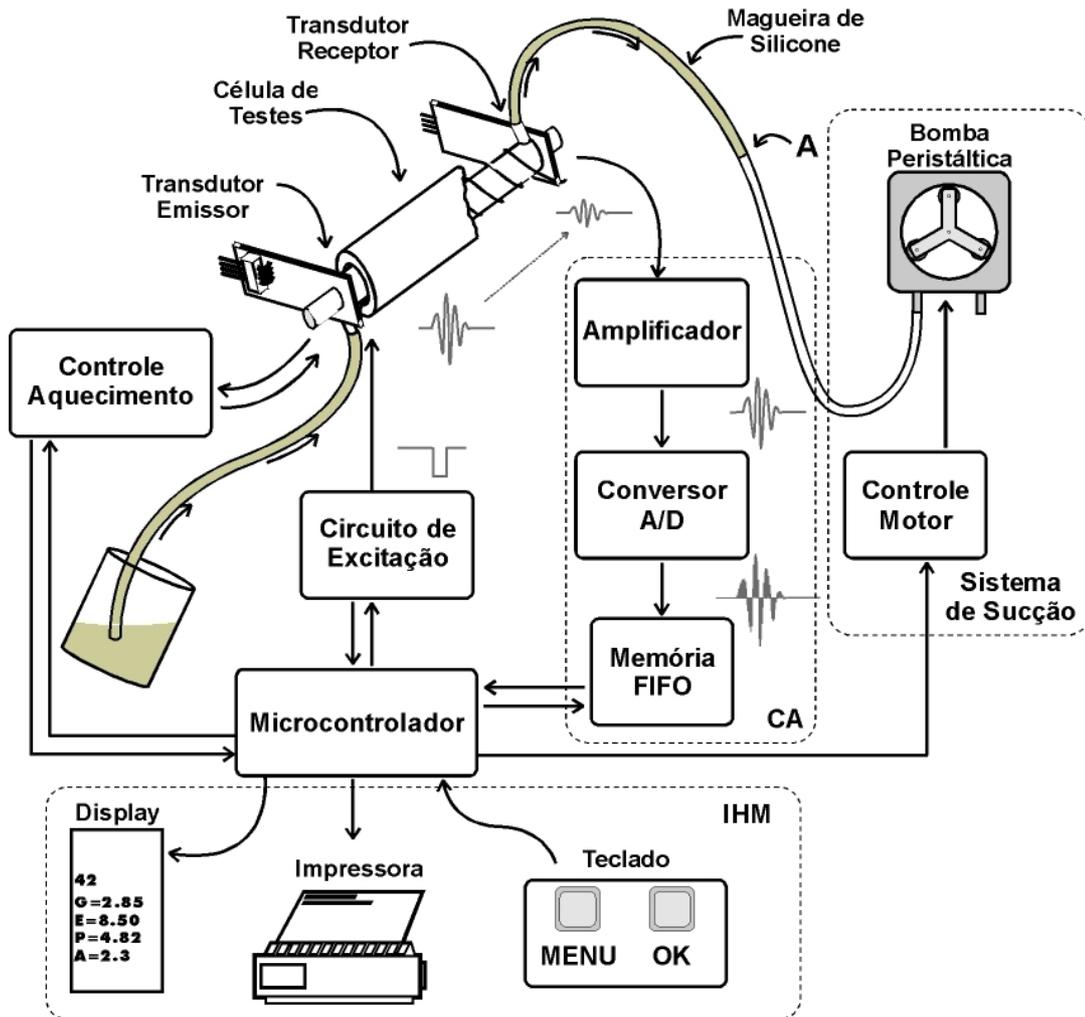


Figura 11 - Diagrama de blocos do sistema desenvolvido. O microcontrolador aciona a bomba peristáltica, preenchendo a célula de testes com a amostra. Em seguida, após a célula atingir a temperatura de trabalho, o Circuito de Excitação aplica pulsos negativos no Transdutor Emissor, o qual os converte em pulsos de ultra-som, que se propagam pela amostra, atingindo o Transdutor Receptor, que os converte novamente em sinal elétrico. Este sinal é amplificado e amostrado no conversor analógico-digital. O sinal amostrado é armazenado temporariamente na FIFO e enviado ao microcontrolador que, a partir de execução de algoritmo, calcula os valores de amplitude e tempo de propagação do pulso que se propagou pela amostra. Estes valores são relacionados às propriedades da amostra e mostrados no *display*.

3.2 CÉLULA DE TESTES

A Figura 12 mostra um diagrama da célula de medição construída. Esta é formada por um tubo de latão, em cujas extremidades estão localizados o Transdutor Emissor (TE) e Transdutor Receptor (TR).

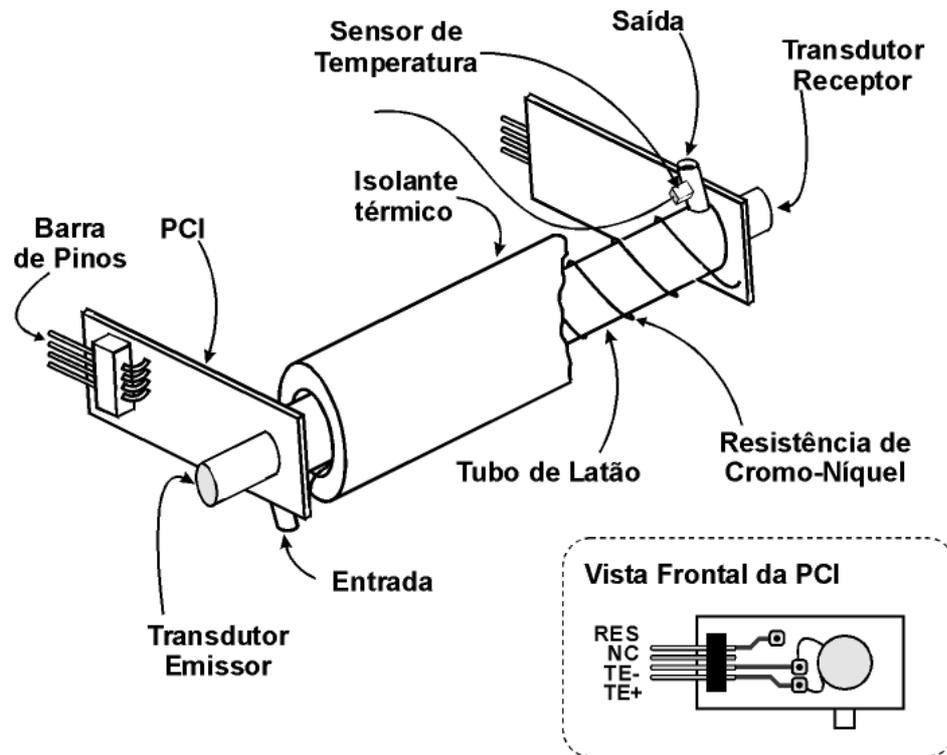


Figura 12 - Célula de testes.

Na parte inferior e superior estão situadas a entrada e saída para as amostras de líquido, respectivamente. Ao redor do tubo foi enrolada uma resistência de cromo-níquel, responsável pelo aquecimento. O conjunto é envolto por um material isolante térmico (manta de rocha). A célula possui 8mm de diâmetro, 5cm de comprimento (distância entre os transdutores) e comporta uma amostra com volume aproximado de 5,5ml. O sensor de temperatura, TMP137, está inserido na célula através de um orifício próximo à saída das amostras.

A PCI à qual está soldado o tubo de latão possui terminais (barra de pinos) que têm como função transmitir os sinais que chegam e saem do TE e TR, respectivamente, além de ligar a resistência ao circuito de aquecimento. Ao serem soldadas, ambas barras de pinos também fornecem sustentação mecânica à célula. O detalhe da Figura 12 contém a vista frontal da PCI onde está montado o TE. A barra de pinos proporciona acesso aos terminais positivo e negativo do TE (TE+ e TE-) e a um dos terminais da resistência que está enrolada ao redor da célula (RES). O terminal NC não está conectado a qualquer dispositivo. A PCI onde está montado o TR é construída de forma semelhante, com barra de pinos contendo dois pinos de acesso aos terminais da cerâmica receptora (TR+ e TR-) e o outro terminal da resistência.

Esta célula utiliza o método de transmissão-recepção a fim de caracterizar as amostras.

3.2.1 Montagem dos transdutores

A seguir serão descritos os passos para a montagem do Transdutor Emissor da célula de testes. O mesmo procedimento foi utilizado para a montagem do Transdutor Receptor.

A célula de testes começa a ser montada com o processo de fixação da placa de circuito impresso ao tubo. A PCI possui um orifício de mesmo diâmetro da cavidade do tubo de latão, a qual serve como passagem para o sinal de ultra-som e, ao redor deste orifício existe uma máscara de solda (onde será depositado estanho com finalidade de fixar a placa ao tubo). Desta forma, as duas peças são alinhadas (orifício da PCI com cavidade do tubo) e soldadas com estanho. A Figura 13 apresenta a PCI (A), as placas de acrílico usinadas (B), o tubo de latão (C) e a cerâmica com fios soldados em suas faces (D).

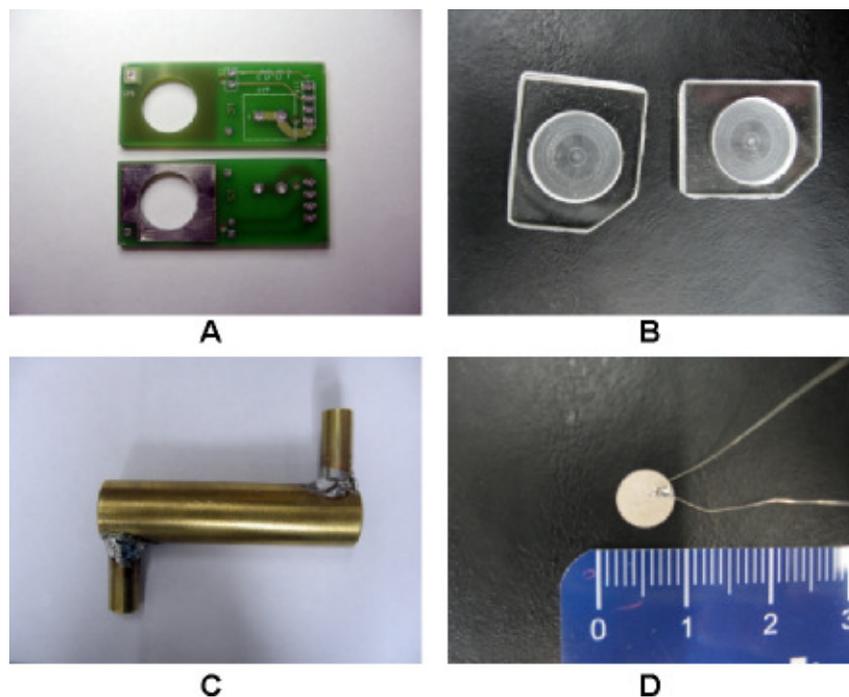


Figura 13 - Componentes da célula. PCI (A), placas de acrílico usinadas (B), tubo de latão (C) e a cerâmica com fios soldados em suas faces (D).

O próximo passo consiste em montar a camada frontal do transdutor. Isto é feito colando-se uma placa de acrílico à PCI. Esta peça consiste em uma chapa com 2mm de espessura na qual foi fresada uma cavidade com 1,5mm de profundidade onde deve ser

acondicionada a cerâmica. Como resultado deste processo, foi produzida uma película de 0,5mm de espessura sobre a qual deve ser acoplada a cerâmica. O acrílico apresenta impedância acústica de $3,26 \times 10^6 \text{kg/m}^2\text{s}$ (ONDA CORPORATION, 2003).

As cerâmicas utilizadas são fabricadas pela Ferroperm e possuem 6,35mm de diâmetro, operam com frequência central de oscilação em 4MHz e são constituídas pelo material PZ27. Este material foi escolhido analisando-se o guia de aplicações do fabricante, que indica que o PZ27 é apropriado para aplicações em ensaios não-destrutivos (*Nondestructive Testing* - NDT) (FERROPERM, 2007).

Outros fatores que contribuíram para a escolha deste material foi seu alto fator de acoplamento com meios biológicos, temperatura Curie alta e baixa taxa de envelhecimento da cerâmica (FERROPERM, 2004).

A escolha da frequência de oscilação das cerâmicas foi feita levando-se em conta o artigo revisado (MILES *et al*, 1990) e a facilidade em manuseá-las, já que quanto maior sua frequência de oscilação, menor sua espessura. O trabalho de MILES (1990) indica que a atenuação significativa do ultra-som devido à gordura ocorre acima de 1MHz, sendo que os experimentos realizados foram na faixa de 1,5MHz a 7MHz. Desta forma optou-se por uma cerâmica com frequência central de 4MHz, que é sensível para caracterizar gordura e possui espessura próxima a 0,5mm, pois valores menores dificultariam a sua manipulação.

Após soldar um fio de cobre em cada eletrodo da cerâmica, a mesma foi colada à peça de acrílico por meio de epóxi líquido. A cola possui tempo de secagem de 15 minutos e é importante pressionar a cerâmica contra a peça acrílica a fim de não possibilitar o surgimento de bolhas durante o processo de secagem.

Com o elemento ativo devidamente colado, o próximo passo é colar a câmara de retenção da camada de retaguarda. Esta peça é colada à peça acrílica utilizando epóxi.

A seguir, a câmara de retenção deve ser preenchida com uma mistura de epóxi e alumina (óxido de alumínio, Al_2O_3). A camada de retaguarda tem como função absorver o sinal ultra-sônico na parte traseira da cerâmica e proporciona rigidez mecânica ao conjunto. O ato de tornar mais difícil a movimentação da cerâmica e absorver os pulsos emitidos pela parte posterior da cerâmica resulta em um pulso de ultra-som mais estreito.

O material empregado na camada foi conseguido misturando-se epóxi e alumina em uma proporção de uma parte de epóxi para duas de alumina, resultando em uma massa pastosa. O material resultante deve ser cuidadosamente depositado sobre a parte posterior da cerâmica, a fim de não produzir bolhas.

A Figura 14 traz um corte longitudinal do transdutor emissor da célula e a Figura 15 representa o fluxograma com todos os passos na montagem deste transdutor.

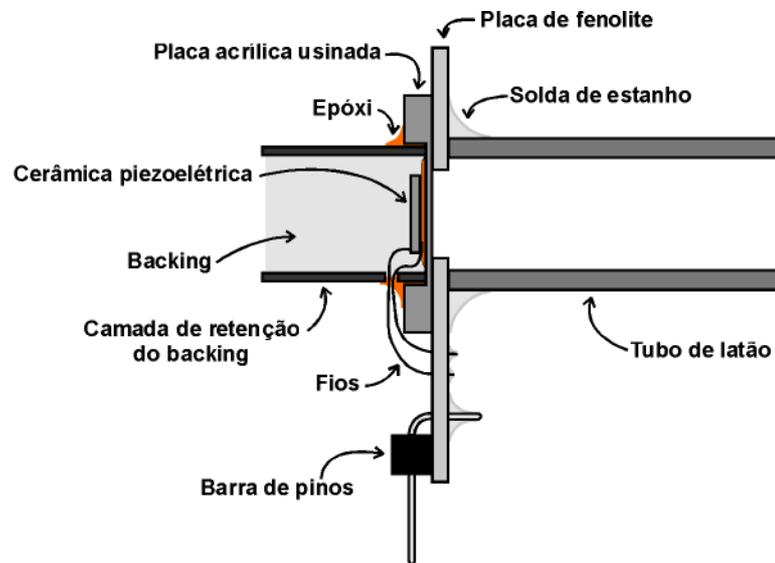


Figura 14 - Seção longitudinal do transdutor emissor da célula de testes.

Calculando o campo próximo do transdutor emissor a partir da Equação 20 obtém-se o valor de 4mm, para uma cerâmica de 4MHz e diâmetro de 6,35mm.

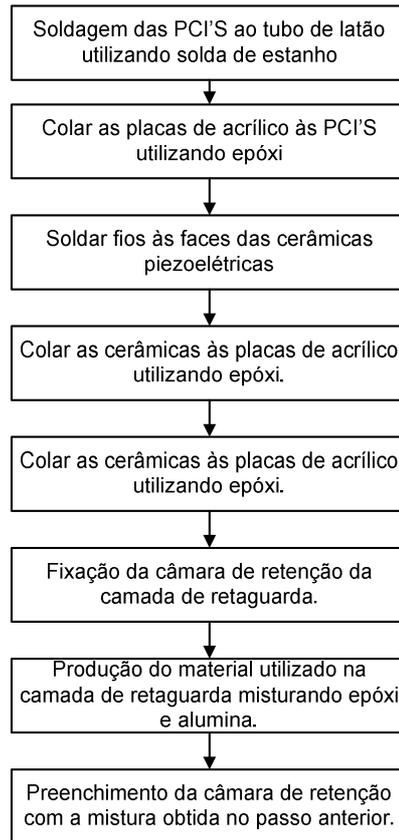


Figura 15 - Fluxograma com a seqüência de passos para a construção da célula de testes.

3.3 DESCRIÇÃO DO *HARWARE* DO SISTEMA

3.3.1 Microcontrolador

No desenvolvimento do protótipo foi empregado o microcontrolador MSP430F1611, da *Texas Instruments Inc.* Este componente foi escolhido por apresentar diversas características importantes para o desempenho de funções de análise e comunicação com os outros blocos do protótipo desenvolvido. Como principais características podem ser citadas (TEXAS INSTRUMENTS, 2005a; TEXAS INSTRUMENTS, 2005b):

- Arquitetura RISC de 16 bits, com ciclo de instrução de 125ns. Clock máximo de 8MHz;

- Disponibilidade de seis portas com oito pinos, que podem operar como pinos de entrada e saída digital genéricos ou como periféricos internos;
- Das seis portas, duas (P1 e P2) possuem capacidade de gerar interrupções a partir de eventos externos;
- 48kB de memória *flash* e 10kB de memória de acesso randômico (*Random Access Memory*, RAM);
- Conversor Analógico-Digital (*Analog-to-Digital Converter*, ADC) com resolução de 12 *bits*, entradas multiplexadas com capacidade para aquisição de até 8 canais externos, e capaz de realizar digitalizações a taxas de 200.000 amostras por segundo;
- Sensor de temperatura embutido.

3.3.2 Interface homem-máquina (IHM)

A IHM é constituída de um *display* de cristal líquido (*Liquid Crystal Display* - LCD), um teclado com dois botões e uma mini-impressora.

A interface gráfica é realizada por meio do *display* gráfico monocromático PE12864LRF-004-H (POWERTIP, 2002). Este *display* trabalha com tensão de 3,3VDC, tem uma área efetiva de 70,7 x 38,8mm² e resolução de 128 x 64 pontos, e possui controlador, *driver* e gerador de tensão negativa embutidos. O LCD é controlado de forma serial e está ligado ao microcontrolador através de 4 pinos: A0, CS, SI e SCL, como pode ser visto na Figura 16.

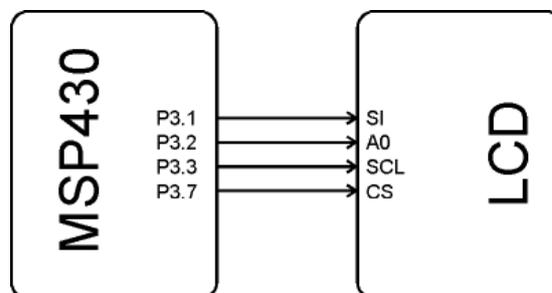


Figura 16 - Ligações entre Microcontrolador e *display* de cristal líquido.

Os resultados salvos na memória *flash* do microcontrolador a cada análise podem ser impressos em uma mini-impressora. O protótipo se comunica serialmente (padrão RS-232)

com uma mini-impressora matricial, a uma velocidade de 9600 BPS, sem *bit* de paridade, com um *start-bit* e dois *stop-bits*. A comunicação RS232 com a impressora foi implementada utilizando-se o μ C e um *driver* padrão RS232 (MAX232), conforme a Figura 17.

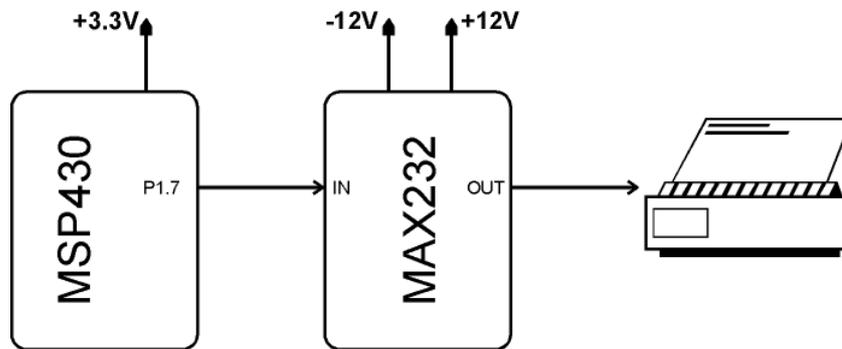


Figura 17 - *Hardware* de controle da impressora.

3.3.3 Circuito de excitação do Transdutor Emissor

Este bloco é responsável por gerar e enviar os pulsos elétricos necessários à geração de ondas ultra-sônicas pelo TE. O diagrama de blocos deste circuito está representado na Figura 18. É formado pelo Circuito de Disparo, *Driver* de Corrente e Circuito de Potência.

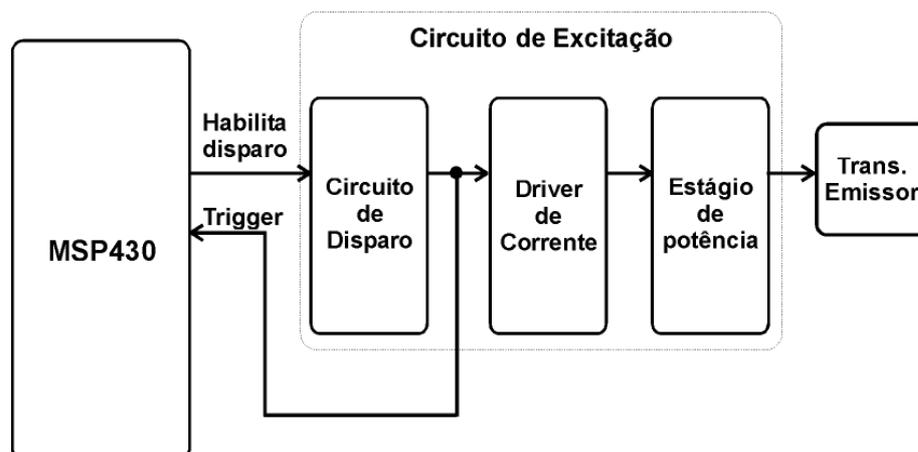


Figura 18 - Circuito de excitação e amplificação.

3.3.3.1 Circuito de disparo

Este circuito está representado na Figura 19 e tem como finalidade gerar pulsos com amplitude de 5V e largura de 100ns, e que se repetam a uma frequência de 150Hz. Isto é conseguido utilizando-se o circuito integrado SN74LS123, da *Texas Instruments*. Este CI é formado por dois módulos multivibradores monoestáveis, sendo que o conjunto R1 e C1 é responsável pela frequência de saída do monoestável 1, e o resistor R2 e capacitor C2 são responsáveis pela largura de pulso do monoestável 2. Da folha de dados do componente foram retiradas as Equações 22 e 23, que definem a largura de pulso nas saídas dos monoestáveis 1 e 2, respectivamente. Selecionando-se valores adequados para R1, C1, R2 e C2, obtém-se a frequência de repetição do monoestável 1, dada pela Equação 25 e a largura do pulso de saída, dada pela Equação 26.

$$T_{w1} = k * R_1 * C_1 \left(1 + \frac{0,7}{R_1} \right) \quad (22)$$

$$T_{w2} = k * R_2 * C_2 \left(1 + \frac{0,7}{R_2} \right) \quad (23)$$

$$T_{w1} = 10ms \quad (24)$$

$$F_1 = \frac{1}{10ms} = 100Hz \quad (25)$$

$$T_{w2} \cong 100ns \quad (26)$$

Ambos pinos de *clear* (1CLR e 2CLR) do CI estão ligados ao microcontrolador. Através do sinal HABILITA DISPARO, ligado a estes pinos, é iniciada a geração dos pulsos de disparo, que são enviados ao estágio de ganho de corrente.

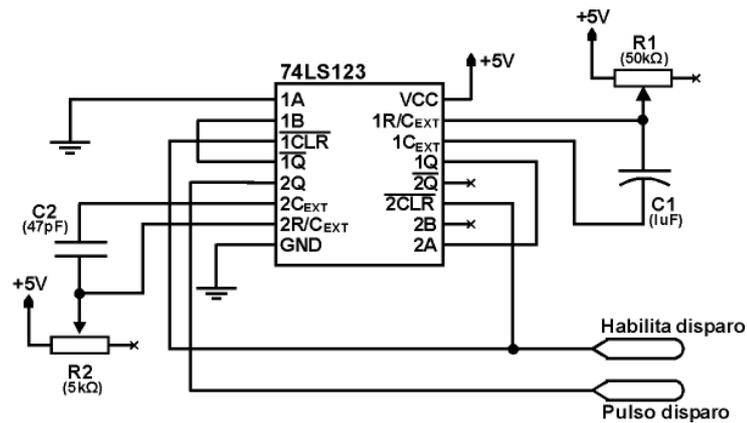


Figura 19 - Circuito de disparo.

3.3.3.2 Driver de corrente

Com o intuito de aumentar a capacidade de fornecimento de corrente para o acionamento do transistor de potência, foi utilizado o circuito integrado TPS2812 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. Neste estágio, o CI recebe o pulso do circuito de disparo e gera o sinal necessário para o acionamento do transistor MOSFET (Pulso disparo'). O *driver* de corrente está representado na Figura 20.

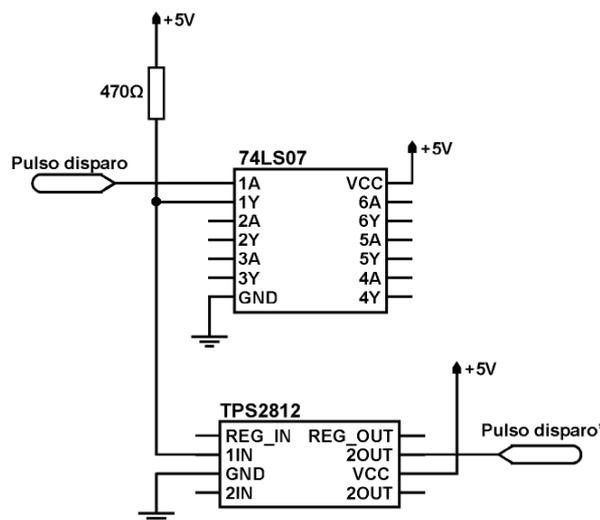


Figura 20 - Driver do circuito de excitação.

3.3.3.3 Circuito de potência

O esquema do estágio de potência pode ser visualizado na Figura 21. O principal elemento deste bloco é o transistor IRF840. O IRF840 é um MOSFET de canal N que pode ser chaveado em altas frequências, para tensões de até +500V e com baixa resistência na região de saturação. No início do trabalho foi escolhido este componente devido sua capacidade em comutar sob altas tensões, pois os transdutores demandavam por uma alta tensão para geração de pulsos de ultra-som. Após a escolha das cerâmicas utilizadas na célula de testes atual, verificou-se que estas necessitavam de tensões de excitação mais baixas para gerar os mesmos sinais de ultra-som, porém optou-se por manter o IRF840, a fim de não realizar novas alterações no hardware.

Ao aplicar o sinal de saída do *driver* TPS2812 ao *gate* do MOSFET acontece a seguinte seqüência de eventos: com nível zero aplicado ao gate, o MOSFET opera na região de corte, fazendo com que o capacitor seja carregado através do resistor de 8,2k Ω , até atingir a tensão de 12V. Quando o sinal no *gate* muda para nível lógico 1, faz com que o transistor trabalhe na região de saturação, aterrando o terminal positivo do capacitor, fazendo com que a tensão sobre o capacitor seja descarregada na carga, com polaridade negativa. O sinal de saída deste estágio deve ser ligado ao terminal negativo do transdutor emissor (TE-). O outro terminal da célula, TE+, é conectada ao terra. Isto foi feito visando não aplicar uma tensão positiva na cerâmica, o que, com o tempo, poderia levar à sua despolarização.

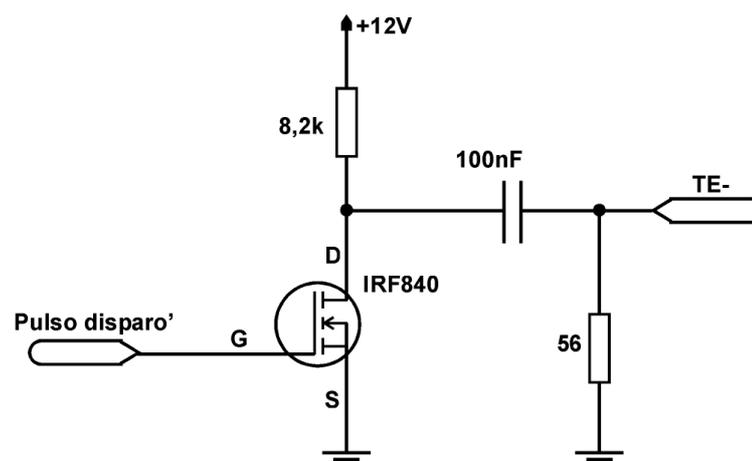


Figura 21 - Estágio de potência

3.3.4 Sistema de aquisição

O sistema de aquisição é formado por um estágio de amplificação, um amplificador diferenciador, um Conversor Analógico-Digital (*Analog-to-Digital Converter*, ADC) e uma memória FIFO (*First-In, First-Out Memory*). A Figura 22 representa o diagrama em blocos do sistema de aquisição.

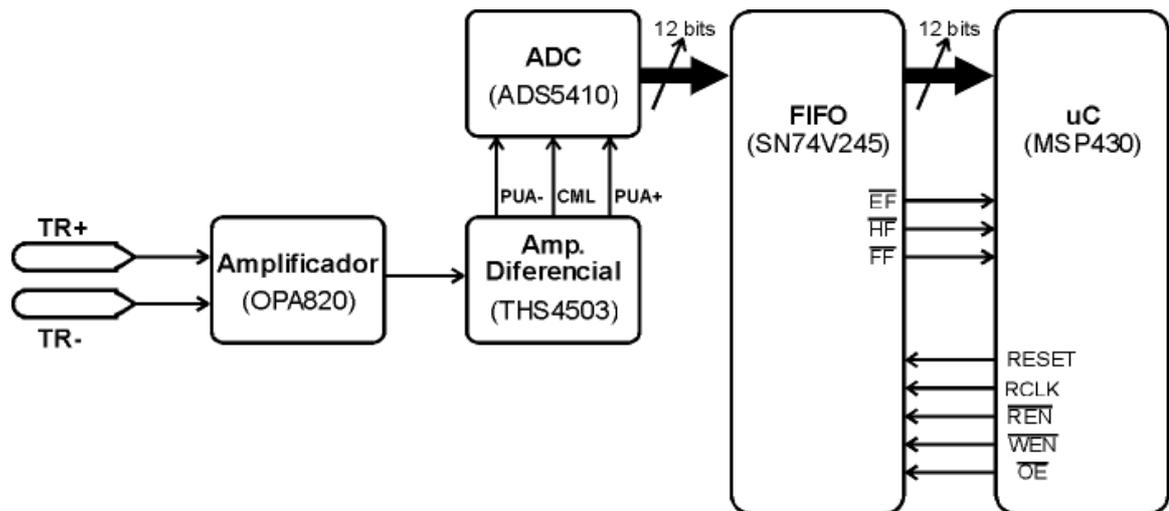


Figura 22 - Diagrama em blocos do Sistema de Aquisição.

3.3.4.1 Circuito de amplificação

A amplificação dos sinais recebidos pelo transdutor receptor é feita pelo amplificador operacional OPA820, da *Texas Instruments*. Este componente apresenta largura de banda (*Bandwidth*, BW) de 240MHz com ganho de +2, taxa de inclinação (*Slew Rate*) de 240V/ μ s e foi utilizado na configuração diferencial, como pode ser visto na Figura 23.

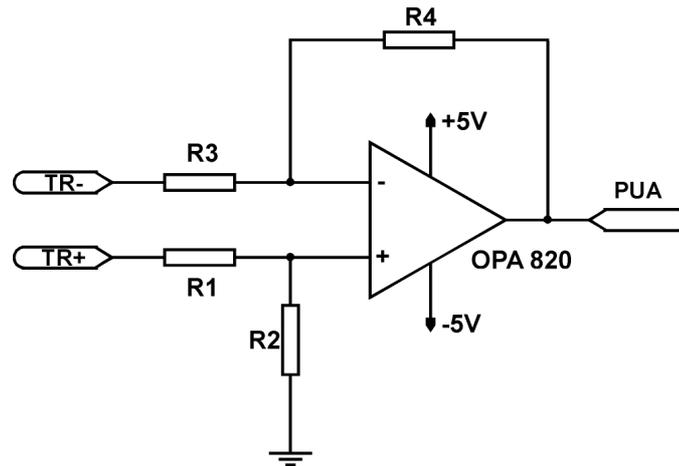


Figura 23 - Amplificador dos sinais recebidos pelo transdutor receptor.

A configuração diferencial apresenta um ganho de tensão dado por:

$$PUA = \left(\frac{R3 + R4}{R1 + R2} \right) \frac{R2}{R3} (TR_+) - \frac{R4}{R3} (TR_-) \quad (27)$$

Se $R1=R3$ e $R2=R4$, a equação é simplificada a:

$$PUA = \frac{R4}{R3} (TR_+ - TR_-) \quad (28)$$

3.3.4.2 Conversor analógico-digital (*Analog-to-Digital converter - ADC*)

Foi utilizado o ADS5410 como conversor analógico-digital. Este ADC foi escolhido devido à sua alta velocidade de conversão (até 80Msps), operação *pipeline* de alto desempenho, pela praticidade de controle (não são necessários sinais e *flags* de controle) e disponibilidade de amostras no laboratório.

Sem a utilização de sinais de controle (tais como sinais de habilitação) o ADS5410 sempre disponibiliza em sua saída os dados digitalizados após seis pulsos de *clock*. O funcionamento deste componente pode ser descrito de maneira mais eficiente observando o diagrama da Figura 24: Tomando a amostra N como exemplo, o valor digitalizado desta

amostra estará disponível na saída do conversor após o tempo de latência (t_d) de 6 ciclos de *clock* do ADC.

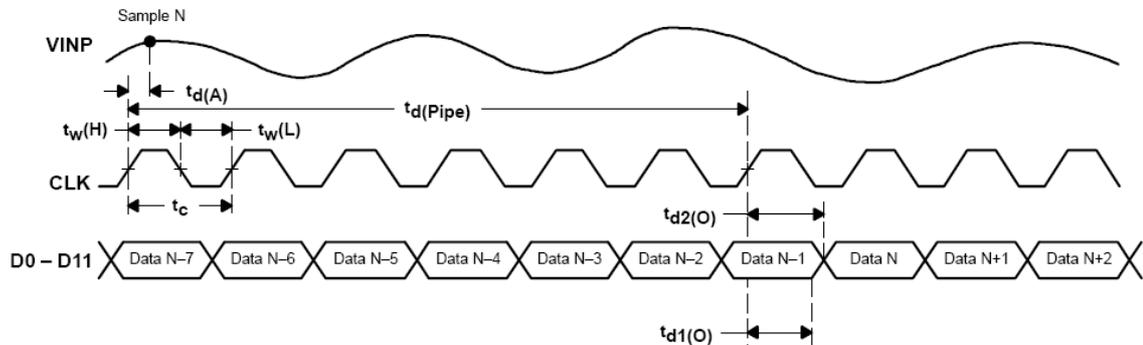


Figura 24 - Diagrama de tempos do conversor analógico-digital ADS5410. Fonte: Adaptado de TEXAS INSTRUMENTS, 2002a.

Algumas características deste componente (TEXAS INSTRUMENTS, 2002a):

- Taxa de conversão máxima de 80 Msps;
- Saída dos dados digitalizados em complemento de 2;
- Resolução de 12 bits;
- Tensões de referência geradas no próprio *chip*;

O conversor analógico-digital necessita que suas entradas analógicas estejam polarizadas em torno de um ponto de tensão comum (*Common Mode Level*, CML). Desta forma, os sinais de entrada podem excursionar ao redor deste ponto comum com amplitudes de $CML+0,5V$ e $CML-0,5V$. O valor de CML pode situar-se entre 1,6V e 1,9V sem afetar a performance do componente (TEXAS INSTRUMENTS, 2002a).

3.3.4.3 Amplificador totalmente diferencial

A tarefa de polarizar as entradas analógicas do ADC é realizada pelo amplificador THS4503, da *Texas Instruments*. Este componente é um amplificador totalmente diferencial (*fully differential*), ou seja, possui entradas e saídas diferenciais, e é responsável por transformar o PUA do bloco de amplificação em sinal diferencial, além de polarizá-lo ao redor do valor de CML, isto foi feito seguindo as orientações das folhas de dados do ADC.

3.3.4.4 Memória FIFO (*First-In First-Out Memory*)

A memória FIFO SN74V245 foi escolhida por sua alta velocidade de transmissão de dados, versatilidade nas opções de operação e disponibilidade de amostras no laboratório.

Este componente é organizado em uma matriz de 4096 posições por 18 bits e suporta frequências de *clock* de escrita e leitura de até 133MHz. Cada porta (entrada e saída) possui *clocks* independentes, o que significa que as operações de entrada e saída de dados podem ser feitas a velocidades distintas. Todas as transferências de dados são feitas a cada borda de subida de *clock*, o que a caracteriza como uma memória síncrona (TEXAS INSTRUMENTS, 2002b).

Duas formas de operação são possíveis com este dispositivo: *First-Word Fall Through* e Modo Padrão. No primeiro modo, a primeira palavra escrita na FIFO é colocada automaticamente na saída do dispositivo após a transição de três ciclos do *clock* de leitura (*Read Clock*, RCLK). No segundo modo, a primeira palavra salva na memória não é colocada na saída da FIFO até que uma operação de leitura seja feita. Este é o modo utilizado pelo sistema de aquisição (TEXAS INSTRUMENTS, 2002b).

3.3.4.4.1 Modo padrão

Para operar neste modo, o SN74V245 deve ser configurado, durante a operação de *Reset* ($\overline{RS} = 0$), utilizando-se os pinos Primeira Carga (*First Load*, \overline{FL}), Entrada de Expansão de Leitura (*Read-Expansion Input*, \overline{RXI}) e Entrada de Expansão de escrita (*Write-Expansion Input*, \overline{WXI}). Conforme as folhas de dados do componente, colocar os pinos \overline{FL} , \overline{RXI} e \overline{WXI} em nível baixo é uma das formas para que a FIFO opere no modo padrão.

Para efetuar uma operação de escrita, o pino Habilita Leitura (*Write Enable*, \overline{WEN}) deve ser colocado em nível baixo e, a cada borda de subida do sinal do *Clock* de Escrita (*Write Clock*, WCLK) uma palavra é salva na memória interna da FIFO. Da mesma forma, para a realização de um ciclo de leitura, o pino Habilita Leitura (*Read Enable*, \overline{REN}) deve ser ativado para que, na próxima borda de subida do *Clock* de Leitura (*Read Clock*, RCLK), seja lida uma palavra da memória. É importante salientar que os *clocks* de escrita e leitura são

independentes entre si, sendo possível realizar operações de escrita e leitura a diferentes velocidades.

O SN74V245 possui um sistema de *flags* que tem a finalidade de sinalizar ao microcontrolador a quantidade de dados escritos em sua memória.

Enquanto a FIFO estiver vazia, o Flag Vazia (*Empty Flag*, \overline{EF}) estará em nível baixo. A fim de começar uma operação de escrita na memória, o pino \overline{WEN} deve ser colocado em zero. A partir disto, os dados presentes nas linhas de entrada da FIFO serão armazenadas a cada borda de subida de WCLK. Logo após a primeira palavra ser gravada na memória, o *flag* \overline{EF} será ativado, indicando que a memória não está vazia.

Se os dados continuam a ser escritos na FIFO, enquanto nenhum ciclo de leitura é realizado, o Flag Metade-Preenchida (*Half-Full Flag*, \overline{HF}) é zerado quando forem escritas 2048 palavras, e o Flag Cheia (*Full Flag*, \overline{FF}) é ativado quando forem escritas 4096 palavras. Com \overline{FF} em estado ativo, a operação de escrita é impossibilitada até que seja feita uma primeira operação de leitura.

Após a operação de leitura de uma palavra, \overline{FF} é ativado e novas operações de escrita podem ser efetuadas. Se novas leituras forem realizadas, enquanto nenhuma operação de escrita é feita, \overline{HF} será ativado quando forem feitas 2048 leituras, e \overline{EF} será colocado em nível baixo quando forem feitas 4096 leituras, impossibilitando novas operações de leitura. A Tabela 2 resume o comportamento dos *flags* do SN74V245 à medida que os dados são escritos e lidos da memória.

Tabela 2 - Tabela contendo os *flags* de status da FIFO para a operação no modo padrão.

Número de palavras escritas na FIFO	\overline{EF}	\overline{HF}	\overline{FF}
0	0	1	1
1 até 2047	1	1	1
2048	1	0	1
2048 até 4095	1	0	1
4096	1	0	0

3.3.5 Amostragem do sinal de ultra-som

Após ser amplificado, o sinal de ultra-som proveniente do TR é digitalizado no ADC a uma taxa de 40Msps.

A taxa de digitalização do ADC é muito superior à frequência de operação do microcontrolador (máximo de 8MHz), impossibilitando a comunicação direta entre estes dispositivos. Desta forma, a FIFO foi utilizada para reter e enviar os dados digitalizados ao microcontrolador enquanto uma nova digitalização não é feita. O SN74V245 recebe os dados digitalizados a uma taxa de 40Mps, os armazena e os transmite a uma frequência de 1MHz, compatível com a operação do microcontrolador.

Esta transferência a uma taxa mais baixa para o microcontrolador é possível, pois há tempo suficiente entre os pulsos de ultra-som recebidos pelo conversor analógico-digital para que a transferência ocorra. O período entre cada pulso é de aproximadamente 10ms ao passo que a transferência de 2048 palavras ao microcontrolador, à frequência indicada, resulta em um tempo de 2ms.

3.3.6 Sistema de aquecimento

O sistema de aquecimento está representado na Figura 25, e é formado pela resistência de cromo-níquel que envolve a célula de testes, uma fonte de tensão de 6V, um interruptor de estado sólido (MOSFET) e um sensor de temperatura acoplado à célula.

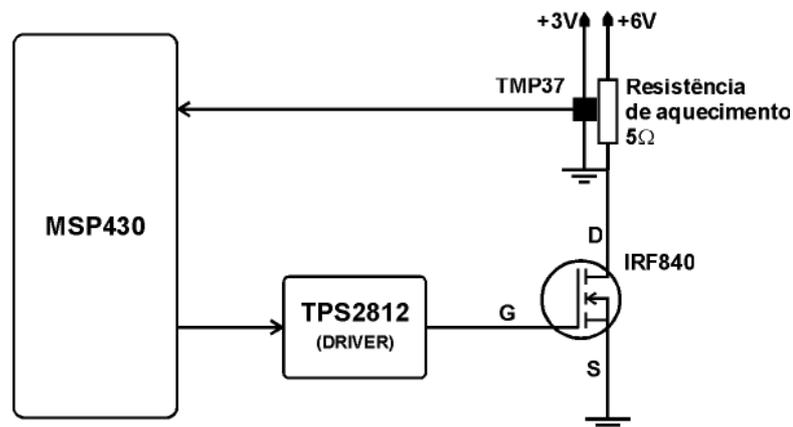


Figura 25 - Sistema de aquecimento.

O sensor de temperatura utilizado é o TMP37, da *Analog Devices*. Este sensor disponibiliza em sua saída um valor de tensão linearmente proporcional à temperatura, em graus Celsius, com erro de $\pm 1^\circ\text{C}$ a $+25^\circ\text{C}$ e $\pm 2^\circ\text{C}$ sobre a faixa de -40°C a $+125^\circ\text{C}$. O TMP37 é adequado para a operação na faixa de temperaturas entre $+5^\circ\text{C}$ e $+100^\circ\text{C}$ e provê em sua saída $20\text{mV}/^\circ\text{C}$, com 500mV a 25°C .

A Figura 26 representa a função de tensão de saída *versus* a temperatura do sensor.

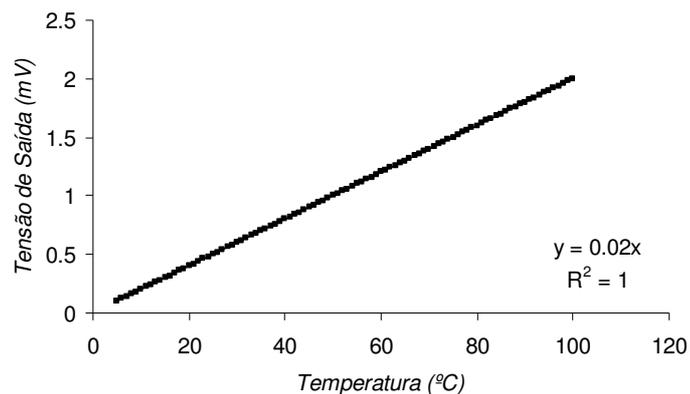


Figura 26 - Função de saída do sensor TMP37 com relação à temperatura. Fonte: Adaptado de ANALOG DEVICES, 2006.

O sensor é alimentado com uma tensão de 3,3V e sua saída é conectada à porta P6.1, correspondente ao primeiro canal do ADC do microcontrolador.

3.3.7 Sistema de sucção

Este bloco é formado pela bomba peristáltica DM100, da Provitec, e pelo circuito de comando do motor CC da bomba. O componente utilizado para o controle é o L298, da ST Microelectronics. O L298 é composto por duas pontes H integradas em um encapsulamento Multiwatt15. Foi utilizado como *driver* o CI 74LS07.

A bomba é movimentada por um motor CC de 12V e um dispositivo multiplicador de torque.

Na Figura 27 está representado o diagrama de blocos do sistema de controle da bomba.

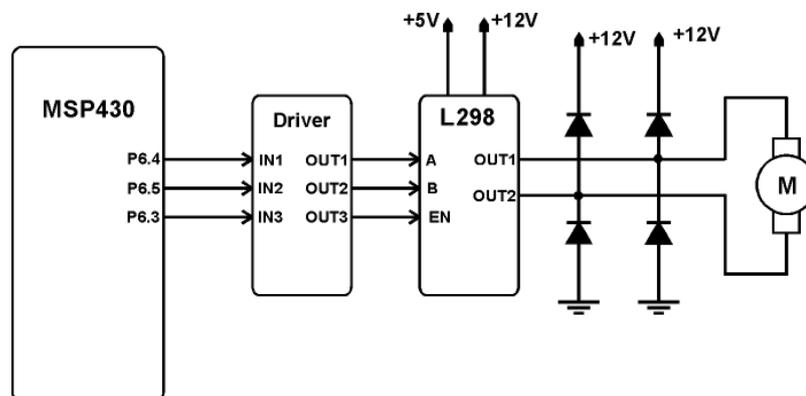


Figura 27 - Diagrama de blocos do circuito de comando da bomba peristáltica.

O protótipo construído possui apenas uma abertura para a passagem de líquidos, ou seja, esta abertura funciona como entrada e saída das amostras a serem testadas. Desta forma, a ponte H é utilizada para mover a bomba de forma a preencher a célula com a amostra e, após a análise ser concluída, esvaziar a mesma. Isto é feito mudando-se os sinais de controle A, B e Habilita_Motor. A Tabela 3 resume as formas de controle da bomba. Com o sinal Habilita_Motor em nível alto, se A=1 e B=0 o motor gira no sentido horário, preenchendo a célula com a amostra. Com A=0 e B=1 o motor gira no sentido anti-horário, esvaziando a célula. Se o pino Habilita_Motor estiver em nível zero, o motor não é acionado.

Tabela 3 – Controle do motor.

Habilita_motor	A	B	Função
1	1	0	Sentido horário
1	0	1	Sentido anti-horário
1	A=B	A=B	Travado
0	X	X	Travado

3.4 DESCRIÇÃO DO *FIRMWARE*

O *firmware* de controle foi desenvolvido em linguagem C utilizando a ferramenta de desenvolvimento IAR Embedded Workbench IDE (*Integrated Development Environment*) para o MPS430F1611, da Texas Instruments. Ele é responsável por todo o controle do sistema, gerenciamento dos circuitos periféricos do microcontrolador, controle da FIFO, configuração e apresentação de mensagens no *display* gráfico, leitura do teclado, controle da bomba peristáltica, controle da temperatura da célula e comunicação com uma mini-impressora.

3.4.1 Rotina Principal

A Figura 28 mostra a rotina principal do *firmware*. Nesta rotina, o primeiro processo corresponde à inicialização e configuração do sistema. Nesta rotina serão inicializadas as variáveis globais e funções do *firmware*, configuração das portas de entrada e saída do microcontrolador, configuração do *Clock* Mestre (*Master Clock*, MCLK) do microcontrolador e configuração e inicialização do LCD. Além disso, nesta rotina é desabilitada a geração de pulsos de excitação do TE pelo Circuito de Excitação e manutenção do motor em estado desligado.

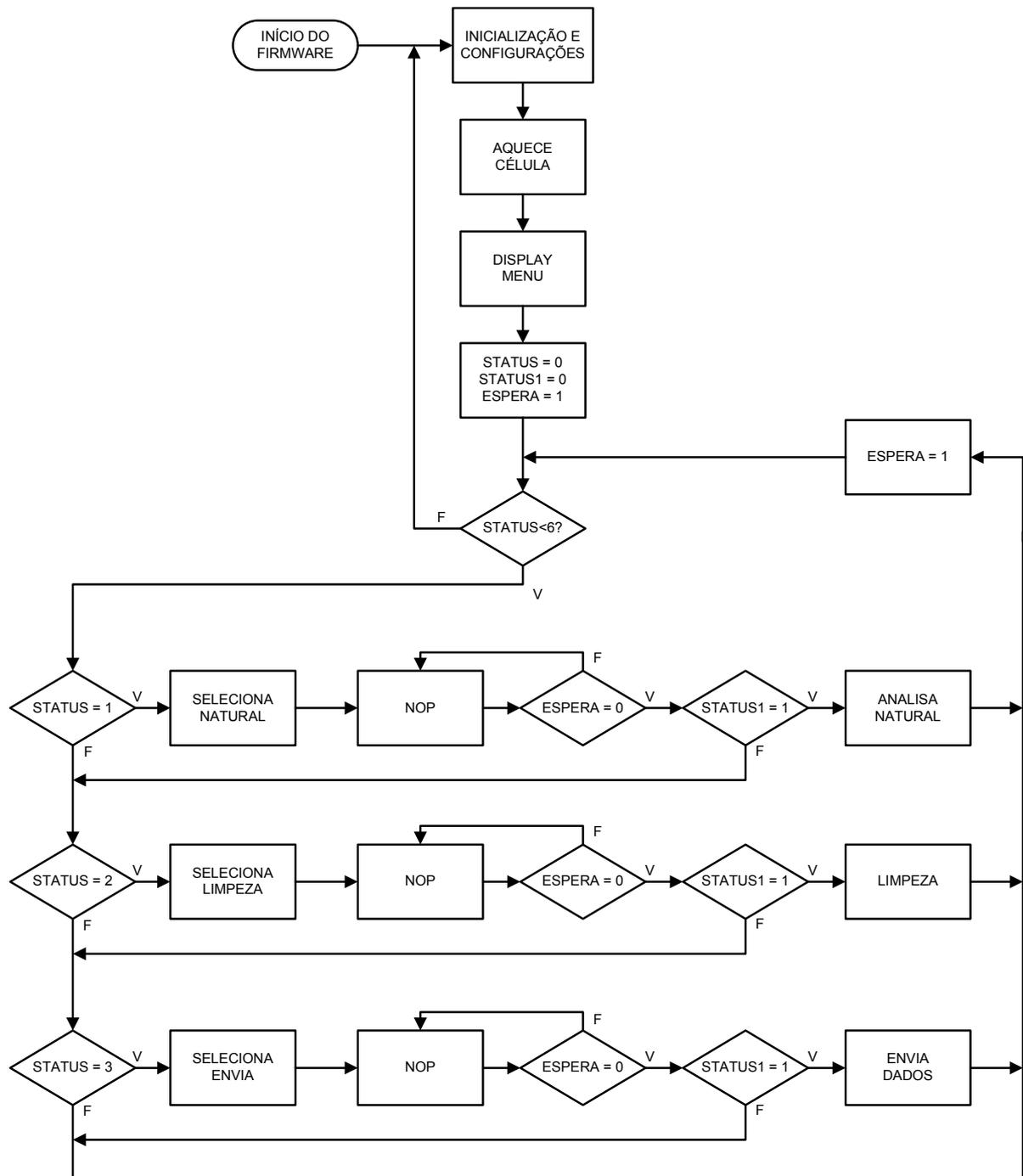


Figura 28 - Laço principal do firmware.

Em seguida, o *firmware* entra na função de pré-aquecimento da célula. O sistema está configurado para aquecer a célula inicialmente a 43°C. Durante o aquecimento é mostrada uma barra de progresso no *display*, indicando a temperatura atual da célula. A seqüência de telas durante o aquecimento inicial é mostrada na Figura 29.

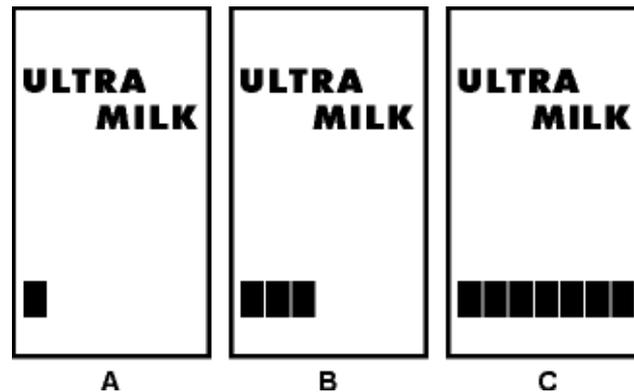


Figura 29 – Seqüência de telas mostradas no display durante o aquecimento inicial da célula do protótipo. Ao ser ligado, o protótipo procede ao aquecimento da célula, mostrando no LCD o nome fantasia do aparelho e o primeiro segmento da barra de progresso (A). À medida que a célula é aquecida, outros segmentos são impressos na barra (B) e (C).

Após o aquecimento, o menu é disponibilizado ao usuário. As opções “Análise de Leite Natural” (mostrado no LCD como NATURAL), “Limpeza da Célula” (LIMPEZA) e “Envio de Dados à Impressora” (ENVIA).

Após a disponibilização das opções do menu no LCD ocorre a habilitação das portas P2.5 e P2.6 para leitura do teclado e é atribuído valor zero às variáveis STATUS, STATUS1 e ESPERA.

Duas portas do μ C foram configuradas como entradas sensíveis à borda de descida e são responsáveis pela leitura das teclas MENU e OK.

Toda vez que MENU for pressionada, será gerada uma interrupção e a variável STATUS é incrementada. Se OK for acionada, será incrementada a variável STATUS1. A variável ESPERA recebe valor zero sempre que qualquer uma das teclas for pressionada.

Após a inicialização de variáveis e periféricos, o *firmware* entra em um laço, onde é analisada a variável STATUS. Ao pressionar a tecla MENU uma vez, STATUS será incrementada, adquirindo valor 1, ao passo que ESPERA receberá valor 0. Dentro do laço, o teste “STATUS=1?” será verdadeiro e a palavra “NATURAL” será sublinhada no *display*.

O próximo processo e teste são utilizados para evitar o chamado efeito de *flickering* da palavra escrita no LCD. O teste verifica se a variável ESPERA é igual a zero. Se o resultado do teste for negativo, o *firmware* fica em um laço, esperando que uma das teclas seja acionada, mantendo escrita e sublinhada a palavra NATURAL. Se qualquer uma das teclas for apertada, ESPERA receberá valor 0, fazendo com que o *firmware* saia deste laço.

Se a tecla acionada foi OK, a variável STATUS1 terá recebido valor 1, fazendo com que o próximo teste, “STATUS1 = 1?”, seja afirmativo, chamando então a função de Análise de Leite NATURAL.

Se, pelo contrário, a tecla pressionada foi MENU novamente, STATUS será incrementada, adquirindo valor 2, sublinhando a palavra “LIMPEZA”, e assim sucessivamente. Esta seqüência de eventos está representada na Figura 30.

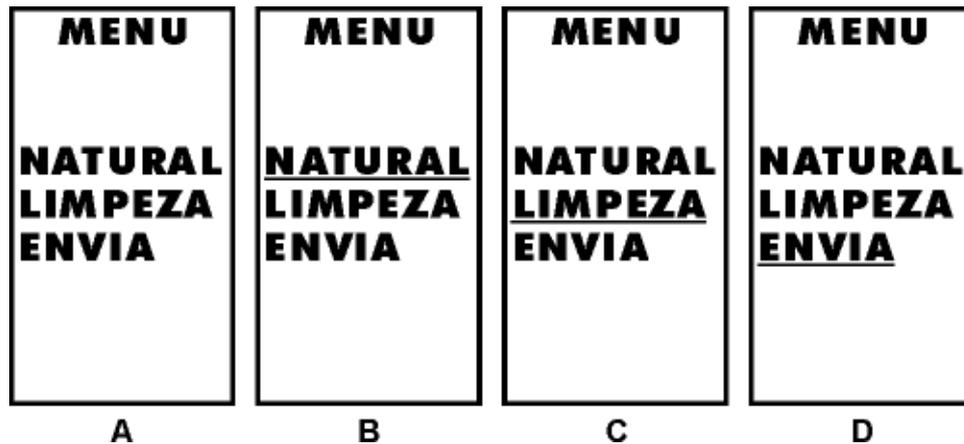


Figura 30 - Apresentação do menu no *display* do protótipo. Menu apresentado logo após o aquecimento inicial da célula (A). Ao pressionar a tecla MENU, a opção NATURAL será sublinhada (B). Pressionando-se novamente a tecla MENU, a opção LIMPEZA será sublinhada (C), e assim sucessivamente (D).

3.4.2 Rotina de análise de leite

Esta função é, na verdade, formada por um conjunto de funções específicas que têm como objetivo realizar diversas tarefas, tais como acionar a bomba peristáltica para preencher a célula com a amostra a ser testada, aquecer a amostra, adquirir os pulsos provenientes da célula, calcular os parâmetros da análise e devolver a amostra. O fluxograma da rotina de análise está representado na Figura 31.

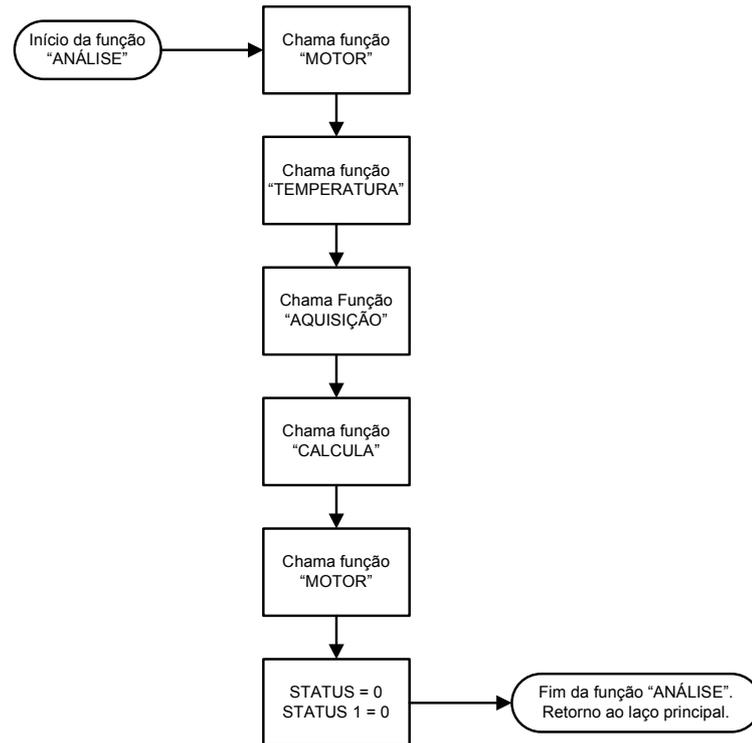


Figura 31 - Função análise de leite.

3.4.3 Função MOTOR (Rotina de controle da bomba peristáltica)

A função MOTOR, cujo fluxograma é mostrado na Figura 32, utiliza dois parâmetros para a escolha da direção e tempo de rotação da bomba: a variável SENTIDO recebe valores 0 ou 1 (preenchimento e escoamento da célula, respectivamente), e DELAY é responsável pelo tempo de funcionamento do motor.

Ao entrar na função, é feito o teste com a variável SENTIDO e, de acordo com a direção escolhida, as portas P6.4 e P6.5 são configuradas conforme a Tabela 3. Em seguida, o sinal Habilita_Motor é ativado, fazendo a bomba girar. O motor é desligado após o término do tempo estabelecido pela variável DELAY.

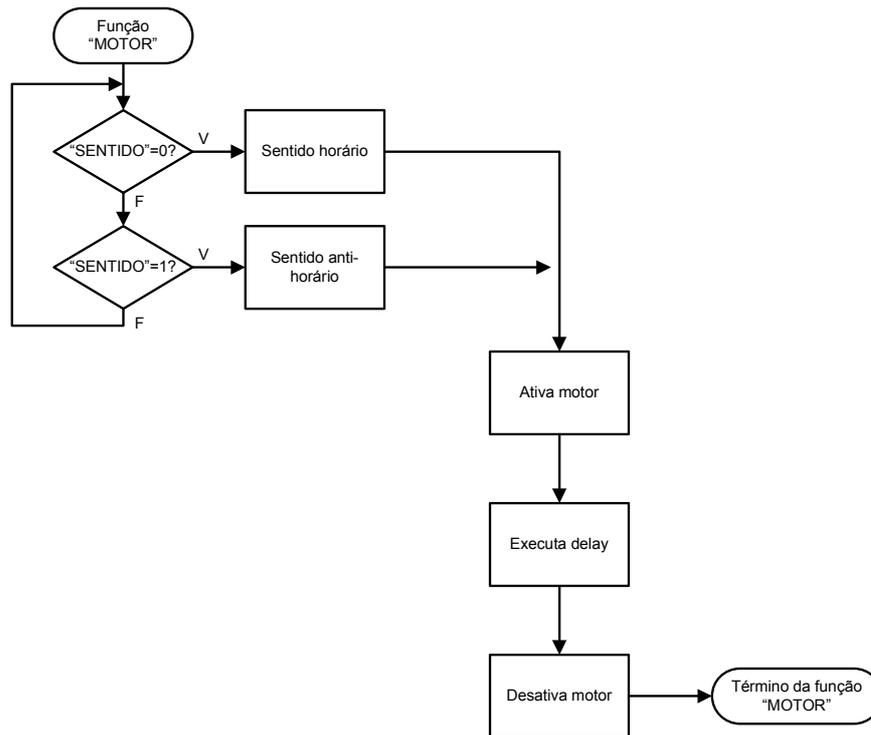


Figura 32 - Função de controle da bomba peristáltica.

3.4.4 Função TEMPERATURA (Rotina de controle de temperatura da célula)

Esta função é responsável pelo controle de temperatura da amostra, medindo a tensão proveniente do sensor e acionando o aquecimento da resistência que envolve a célula. Ela está representada na Figura 33.

Inicialmente, o ADC do microcontrolador é configurado para leitura contínua da porta P6.0, habilitar a geração de tensão de referência interna de 1,5V e período de amostragem de 1024 ciclos de *clock*.

Em seguida, o periférico é habilitado a iniciar as operações de conversão e o *firmware* entra em um laço, onde a tensão proveniente do sensor é lida e digitalizada. Este valor de tensão é utilizado para calcular a temperatura à qual o sensor está submetido. O TMP37 fornece em sua saída uma tensão 20mV/°C, apresentando 500mV a 25°C. A partir da Figura 26 obtêm-se a função de transferência do sensor, representada pela Equação 29.

$$V_{TEMP} = 0,02.T_{SENSOR} \quad (29)$$

A partir da Equação 29 e das configurações estabelecidas para o ADC obtém-se a equação para o cálculo da temperatura, representada pela Equação 32.

$$T_{SENSOR} = \frac{V_{TEMP}}{0,02} \quad (30)$$

$$T_{SENSOR} = \frac{\left(\frac{V_{REF} \cdot ADC12MEM0}{A} \right)}{0,02} \quad (31)$$

$$T_{SENSOR} = \frac{75 \cdot ADC12MEM0}{A} \quad (32)$$

onde:

- A é igual a 4095 e é dado por $2^{(RESOLUÇÃO)} - 1$.
- $V_{REF} = 1,5V$.

Dentro do laço, as últimas oito leituras são guardadas em um acumulador para que seja feita uma média. Em seguida, o primeiro segmento da barra de progresso é desenhado no *display* e são feitas comparações a fim de imprimir os segmentos da barra de acordo com a temperatura da amostra. Por exemplo, se o valor de temperatura for maior ou igual a 32°C (se uma análise de leite foi requerida), o segundo segmento da barra de progresso será impresso. Do contrário, somente o primeiro segmento é mostrado, até que seja atingida a temperatura de 32°C.

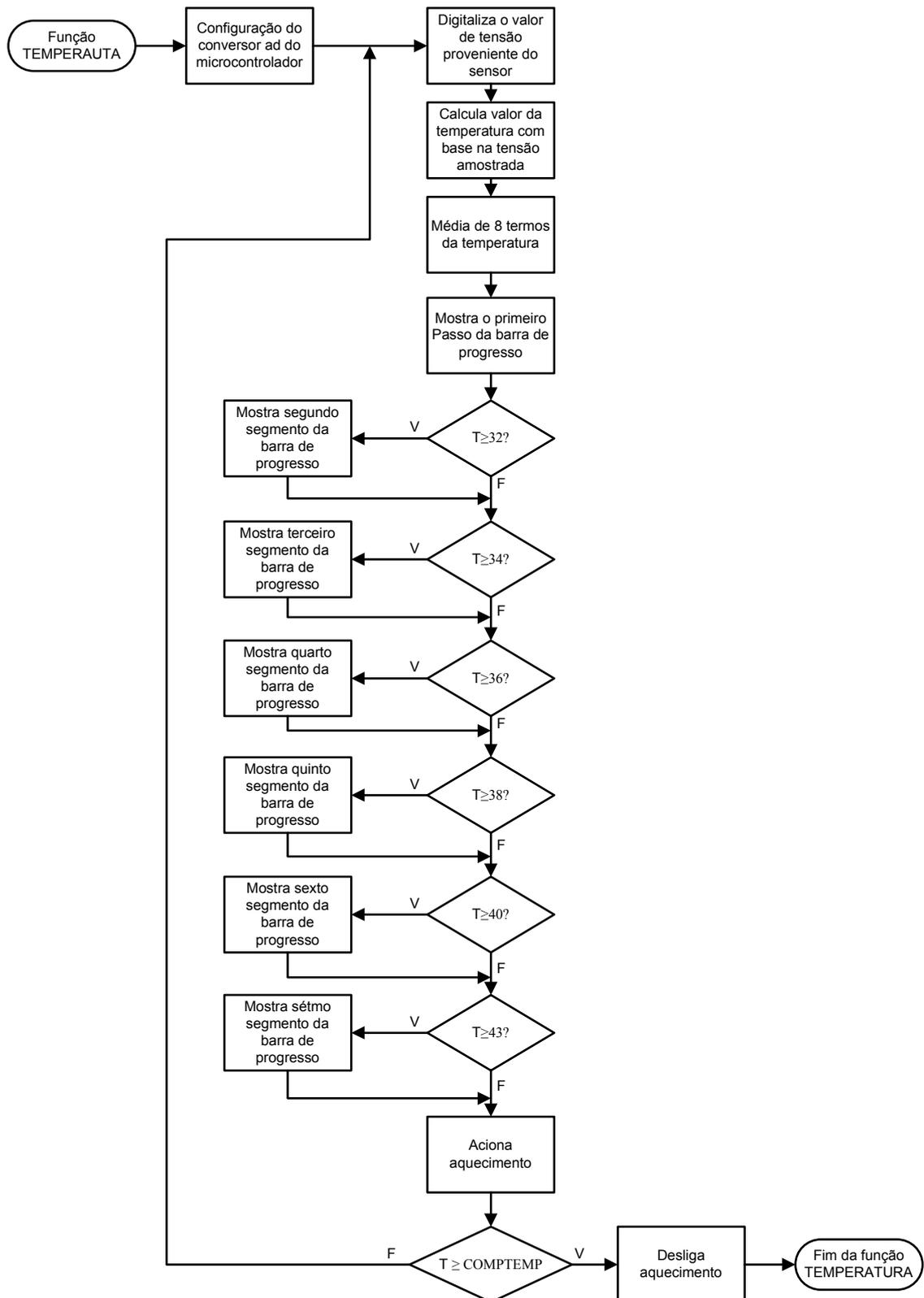


Figura 33 - Fluxograma da função TEMPERATURA.

Ao fim da seqüência de testes para imprimir os segmentos da barra de progresso, o microcontrolador habilita o aquecimento da amostra, fazendo com que a resistência que envolve a célula seja colocada sob uma tensão de 6V, através do MOSFET IRF840.

Em seguida, o valor de temperatura medido é comparado ao valor que foi inserido como argumento da função TEMPERATURA, COMPTEMP (43°C) para funções de análise e calibração). Se o valor medido na última leitura for maior que COMPTEMP, o microcontrolador desabilita o aquecimento da célula, terminando a função TEMPERATURA e retornando ao local do *firmware* onde esta função foi chamada.

Se o valor medido for menor, o *firmware* continua no laço, fazendo novas leituras do ADC e imprimindo os valores correspondentes da barra de progresso, até que o valor de COMPTEMP seja atingido.

3.4.5 Rotina de aquisição

A rotina representada na Figura 34 tem como objetivo habilitar a geração de pulsos pelo TE e transferir os dados digitalizados no ADS5410 para o microcontrolador. Na verdade, a cada análise, são digitalizados 32 pulsos de ultra-som e feita uma média com os valores de amplitude máxima (AMP) e tempo de propagação (DES) de cada pulso.

Ao iniciar o laço, é habilitada a geração de pulsos pelo Circuito de Excitação através do sinal Habilita disparo (vide Figuras 18 e 19). Quando este sinal apresenta nível alto, o circuito gera os sinais elétricos que são aplicados no TE.

Em seguida, o *firmware* espera que a variável TRIGG adquira valor 1 para que seja iniciada a aquisição dos dados. Isto é feito com o intuito de medir corretamente o tempo de propagação do pulso de ultra-som na amostra, garantindo que o tempo de atraso (TA) entre o pulso de disparo e a janela de amostragem seja sempre o mesmo (vide Figura 35).

A porta P2.1 do microcontrolador é ligada à saída do Circuito de Excitação. Desta forma, quando esta porta detectar uma borda de subida, é chamada a rotina de tratamento de interrupção da porta P2. Dentro desta rotina, a variável TRIGG recebe valor 1. Após o retorno da rotina de tratamento de interrupções, dentro do laço, o teste “TRIGG = 1?” será afirmativo, procedendo ao processo de aquisição dos dados digitalizados. Neste processo, a geração de pulsos pelo Circuito de Excitação é desabilitada, a variável TRIGG é zerada e a variável de controle do laço Q incrementada. A seguir, é chamada a função “ESCREVE_FIFO”, responsável por escrever 2048 palavras de 12 bits na FIFO.

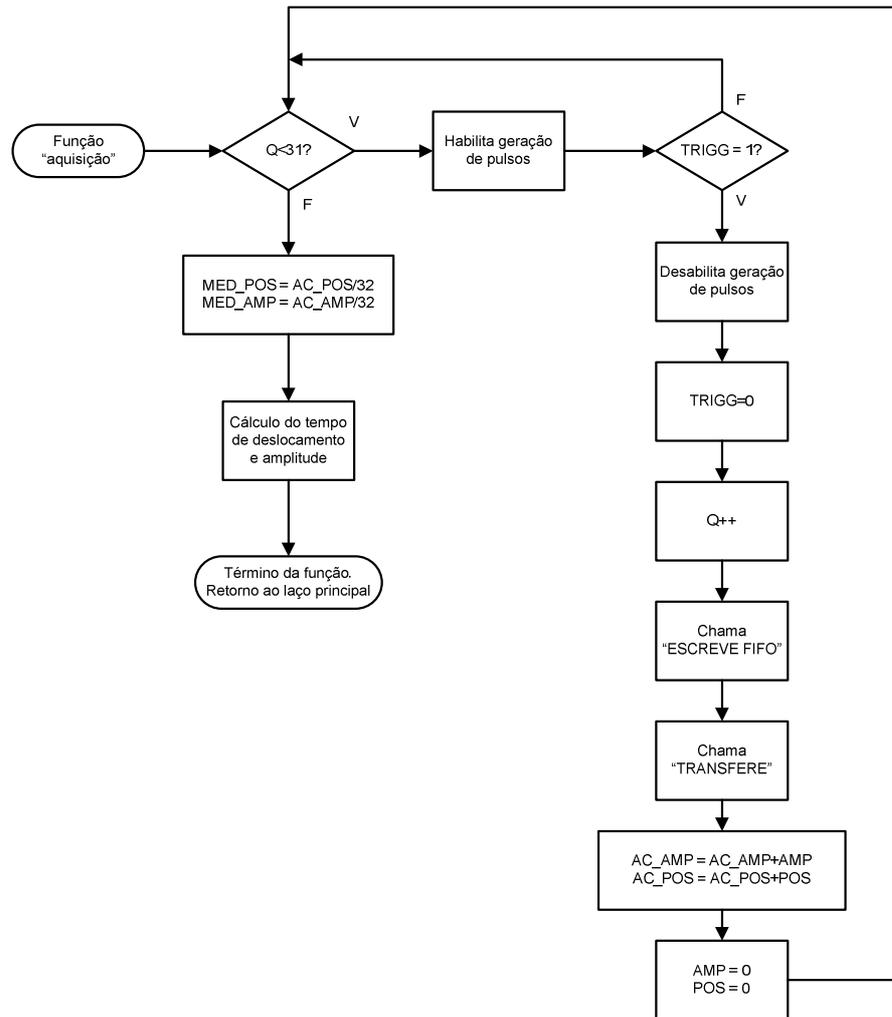


Figura 34 - Função de aquisição dos pulsos de ultra-som.

Depois que a FIFO é preenchida, é chamada a rotina “TRANSFERE” que controla a transferência das palavras do SN74V245 para o microcontrolador. Esta rotina também é responsável por retificar o sinal adquirido e encontrar a máxima amplitude do pulso e sua posição no tempo em relação ao pulso de disparo.

As variáveis de saída da função TRANFERE, MED_AMP e MED_POS, acumulam os valores de amplitude máxima e da posição onde ocorre a máxima amplitude do pulso a cada execução do laço e, depois de concluídas as 32 repetições e sair do laço, é feita uma média de cada uma destas variáveis.

O próximo passo consiste em calcular o valor real de tensão e tempo de propagação a partir de MED_AMP e MED_POS.

Para calcular o tempo de propagação deve ser levada em conta a frequência de amostragem do sinal. Como a taxa de conversão utilizada é de 40MSPS, é feita uma

digitalização a cada $1/40\text{MHz} = 25\text{ns}$. Desta forma, é possível calcular o instante da máxima amplitude do pulso da seguinte maneira:

$$T_{TD} = T_{JM} + T_A \quad (33)$$

onde T_{TD} é o Tempo Total de Atraso, correspondente ao tempo decorrido desde o pulso de disparo até o instante de máximo valor de amplitude do pulso de ultra-som recebido; T_{JM} é o tempo decorrido desde o início da Janela de Amostragem até o instante de máximo valor de amplitude do pulso de ultra-som e é dado por $MED_POS * 25\text{ns}$ e T_A é o Tempo de Atraso correspondente ao intervalo entre o pulso de disparo e o início da amostragem do sinal (janela de amostragem). O tempo de atraso é definido pelo conjunto de instruções constantes no *firmware*, do momento em que é habilitada a geração de pulsos pelo Circuito de Excitação até o momento em que começam a ser escritos os dados na FIFO, incluindo o tempo de tratamento de interrupções. A Figura 35 auxilia na compreensão da situação descrita.

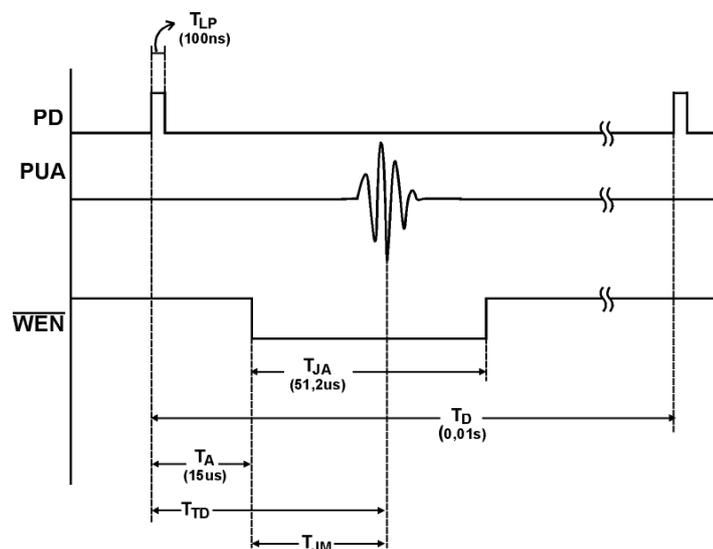


Figura 35 - Pulso de disparo e sinal de ultra-som. PD é o pulso de disparo, PUA representa o Pulso de Ultra-Som Amplificado e *WEN* (*Write Enable*). T_{LP} é a largura do pulso de disparo, T_D é o período entre dois pulsos de disparo e T_{JA} é o período da janela de amostragem.

Para a determinação da amplitude do pulso, em mV, foi feito um ensaio com o ADS5410 a fim de obter a relação de tensão de entrada *versus* saída digital em 12 bits. Utilizando um gerador de funções, foi aplicada na entrada do dispositivo uma forma de onda senoidal com frequência de 4MHz, variando sua amplitude. A Figura 36 representa a relação entre amplitude do sinal de entrada com as palavras digitalizadas no conversor.

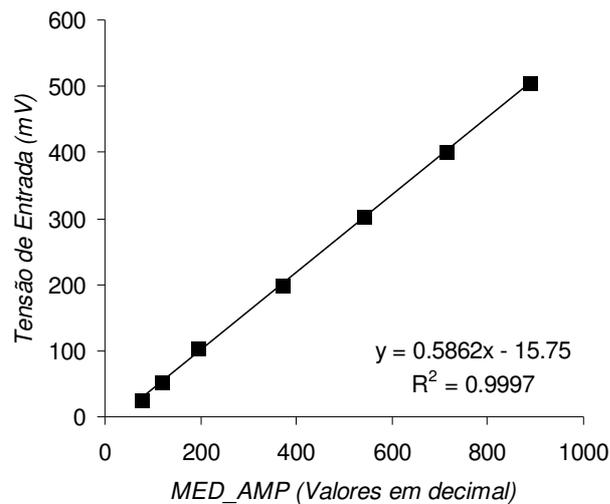


Figura 36 - Relação entre amplitude do sinal de entrada e palavras digitalizadas no conversor. Dados obtidos à temperatura ambiente.

Desta forma, a amplitude do pulso de ultra-som é calculada a partir da relação:

$$V_{AMPL} = 0,5862(MED_AMP) - 15,75 \quad (34)$$

onde V_{AMPL} correspondente ao valor de pico do pulso de ultra-som digitalizado, em mV, e MED_AMP a média dos valores digitalizados.

Os valores do tempo total de propagação e amplitude do pulso de ultra-som são guardados nas variáveis TTD e V_{AMPL} , respectivamente.

3.4.6 Função ESCREVE_FIFO

Esta função (Figura 37) é responsável por habilitar a escrita de dados no SN74V245. A rotina começa com a configuração da porta P1.0 como entrada sensível à borda de descida. Em seguida, acontece a configuração da FIFO, desabilitando as operações de escrita e leitura no dispositivo e efetuando uma operação de RESET, para que os ponteiros de escrita e leitura apontem para as posições iniciais da FIFO. Automaticamente, após o RESET, os *flags* \overline{HF} e \overline{FF} são configuradas em nível alto, ao passo que \overline{EF} é colocado em nível baixo, indicando que o dispositivo encontra-se vazio. Esta operação é aconselhada nas folhas de dados do

SN74V245, antes que seja efetuada qualquer operação de escrita. Também, durante o RESET, os registradores de saída são zerados.

Após a ativação de operação da escrita, o *firmware* entra em um laço onde o *flag HF* é monitorado. Assim que o SN74V245 for preenchido com 2048 palavras de 12 bits, o *flag HF* será colocada em nível baixo, fazendo com que a porta P1.0 gere uma interrupção, saindo do laço.

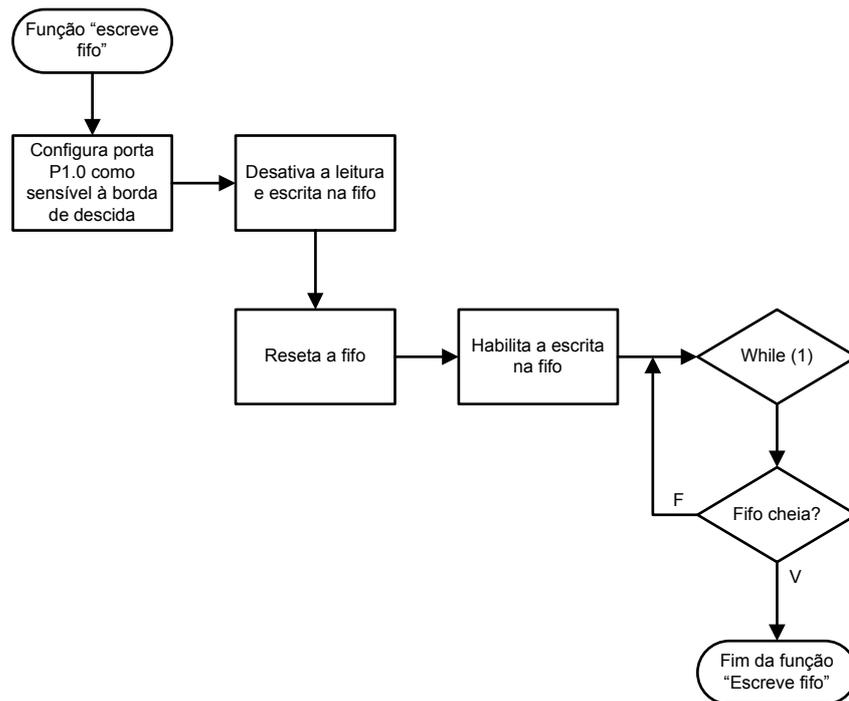


Figura 37 - Função ESCRIVE-FIFO.

3.4.7 Função TRANSFERE

A função TRANSFERE (Figura 38) é responsável por copiar os dados da FIFO para o microcontrolador, retificar o sinal dos pulsos de ultra-som e encontrar o máximo valor do sinal retificado (AMP) e sua posição dentro do vetor do sinal amostrado (POS).

Na FIFO foram guardadas 2048 palavras de 12 bits, geradas pelo ADC e, da forma como foi construído o hardware, a porta P5 recebe os oito bits menos significativos (Q0 a Q7), enquanto que a porta P4 recebe os quatro mais significativos de cada palavra (Q8 a Q11). A Figura 39 ilustra esta situação.

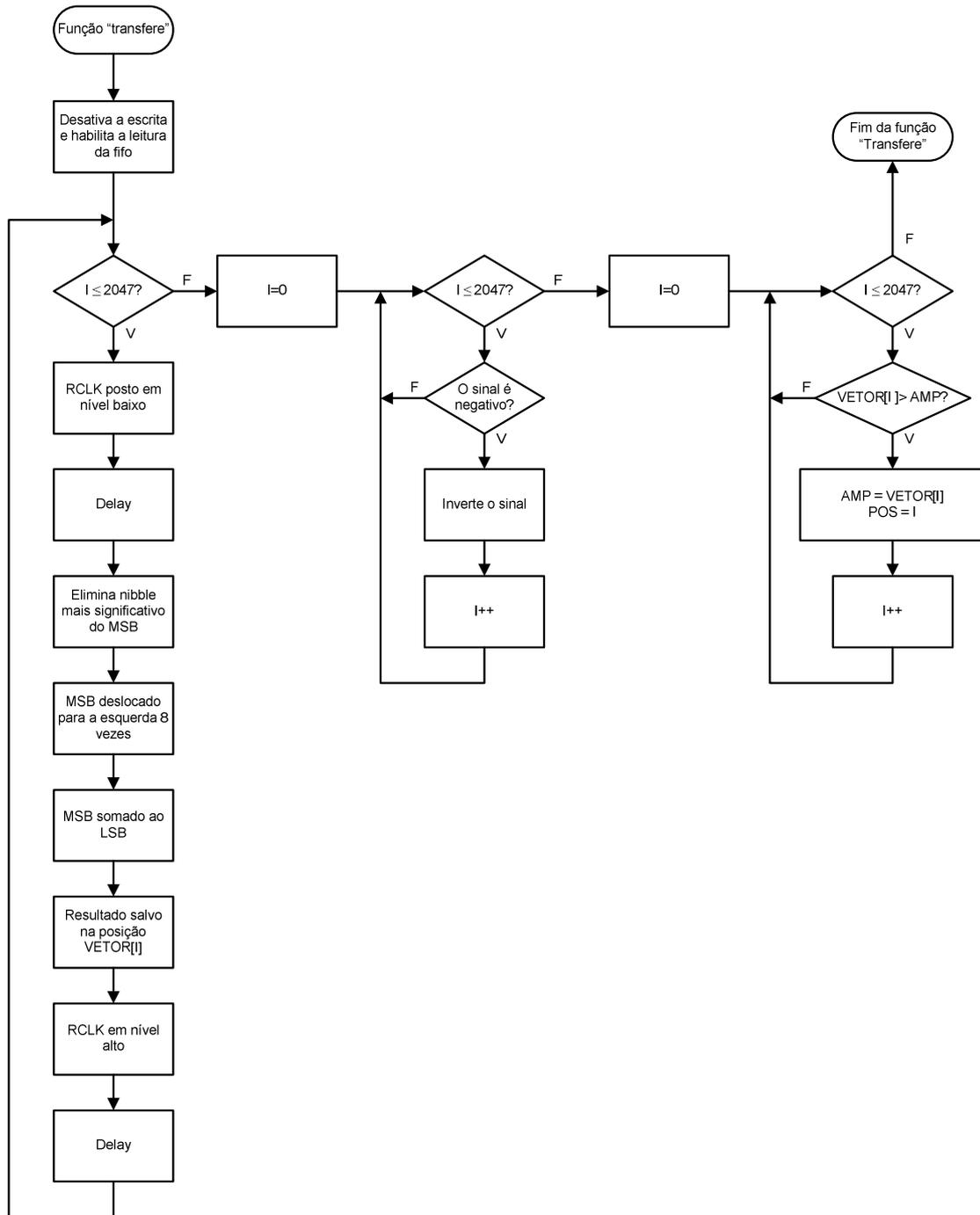


Figura 38 - Rotina TRANSFERE.

Assim, o que deve ser feito é ler os dados presentes na porta P5 e uni-los às palavras lidas da porta P4, colocando o resultado em uma variável de 12 bits, que por sua vez será armazenada em um vetor de 2048 posições.

Esta rotina começa com a não habilitação de escrita e ativação do modo de leitura da FIFO. A seguir, o *firmware* entra em um laço de 2048 repetições. Em cada execução do laço,

o sinal de WCLK é configurada em nível alto, fazendo com que uma leitura seja feita pelas portas P4 e P5.

Como a porta P4 está ligada não somente aos pinos de dados, como também a alguns pinos de controle da FIFO (\overline{WEN} , \overline{RESET} , \overline{REN} e \overline{OE}), é necessário que seja feita uma operação com o intuito de receber somente os bits relacionados aos dados recebidos.

Desta maneira, os bits da porta P4 são multiplicados *bit a bit* com uma máscara de valor “00001111b”. Em seguida, o resultado desta operação é deslocado para a esquerda oito vezes. Ao final, o valor deslocado da porta P4 é somado ao valor lido na porta P5, formando uma palavra de 12 bits, a qual é salva na primeira posição do vetor de 2048.

Por fim, o sinal WCLK é colocada em nível baixo. É importante salientar que, depois de cada mudança de nível de *clock*, é executado um *delay* a fim de criar como *clock* uma forma de onda quadrada com aproximadamente 50% de *duty cycle*.

A Figura 40 representa cada passo descrito na leitura dos dados da FIFO.

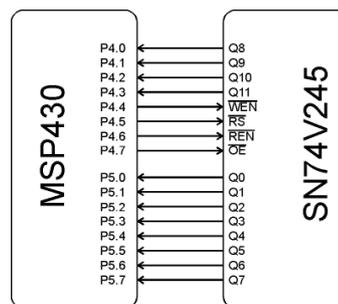


Figura 39 - Ligação entre FIFO e MSP430.

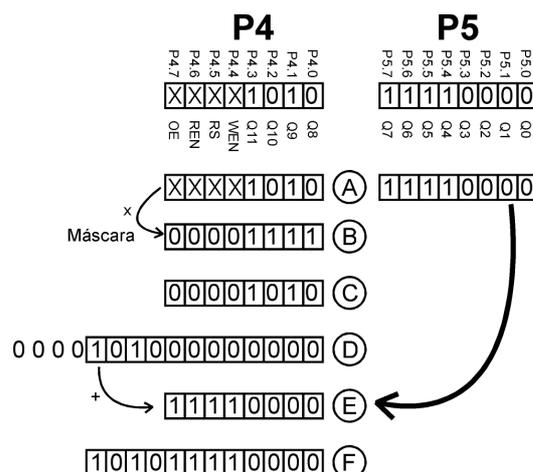


Figura 40 - Seqüência para montagem das palavras a serem salvas no VETOR. Em (A) os valores das portas P4 e P5 são lidos. Em seguida, os dados lidos de P4 são multiplicados por uma máscara a fim de eliminar os sinais de WEN, RS, REN e OE (B), tendo como resultado o byte do passo (C). Este byte é deslocado 8 vezes para a esquerda (D) e somado ao valor lido na porta P5, resultando na palavra de 12 bits em (F).

A próxima etapa consiste em retificar o pulso amostrado com o intuito de adquirir uma forma de envelope do mesmo.

O conversor ADS5410 fornece os dados digitalizados em complemento de dois, desta forma o *firmware* entra em um laço de 2048 repetições onde o 12º *bit* (o *bit* de sinal da palavra) será testado. Se o *bit* indicar que a palavra é negativa, o *bit* de sinal é invertido.

Em seguida, o *firmware* é direcionado a um laço onde serão encontrados os valores de amplitude máxima (AMP) e sua posição (POS) dentro do VETOR.

A variável AMP entra no laço com valor zero. Em seguida ela é comparada ao primeiro valor do vetor, VETOR[0]. Se este valor for maior que AMP, AMP receberá o valor de VETOR[0] e POS sua posição, 0. Caso contrário, o valor será ignorado. Este laço é repetido 2048 vezes, varrendo todo o vetor.

A Figura 41 auxilia a compreensão da função TRANSFERE. O PUA é amostrado, resultando em um pulso de ultra-som som digitalizado (PUAD), o qual é retificado e feita uma varredura do mesmo, a fim de se encontrar a máxima amplitude do PUAD e a posição onde ocorreu o pico. O PUAD é armazenado temporariamente na FIFO e transferido para o microcontrolador, onde é retificado, resultando no pulso de ultra-som digitalizado e retificado (PUADR). Em seguida, o PUADR passa por uma varredura, onde é encontrado o valor de pico do pulso e sua posição no tempo.

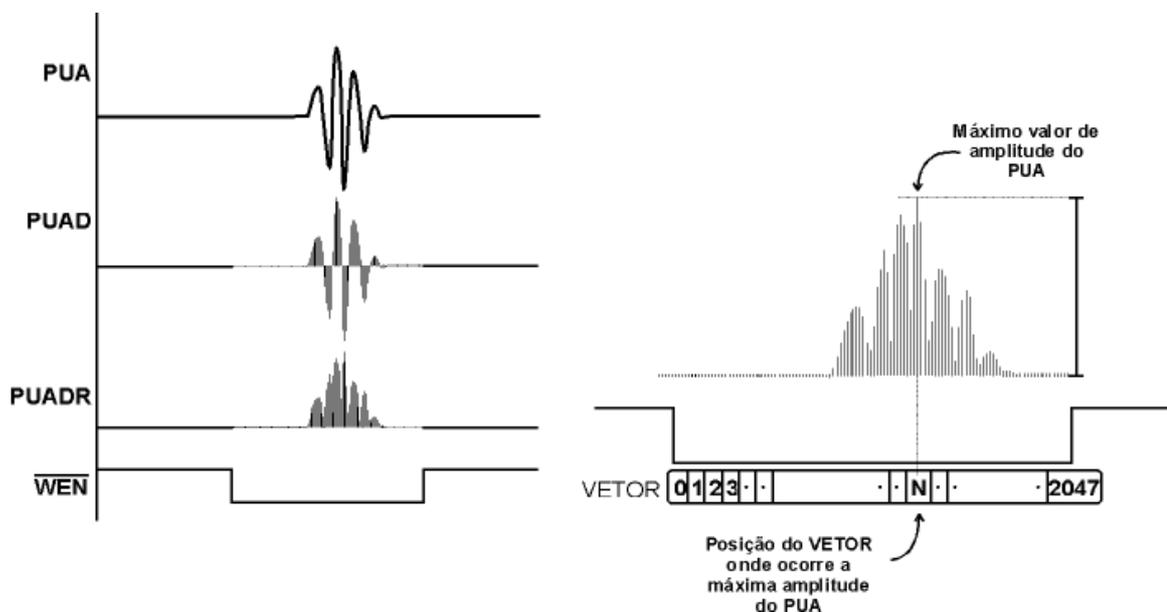


Figura 41 – Retificação e identificação do valor de máxima amplitude do PUA e sua posição dentro do vetor amostrado. O pulso de ultra-som amplificado (PUA) é amostrado pelo ADS5410, gerando o pulso de ultra-som digitalizado (PUAD).

3.4.8 Função CALCULA

Esta função, representada na Figura 42, tem como objetivo calcular os valores de Gordura, ESD, Água Adicionada e Proteínas da amostra a partir dos valores de amplitude e propagação do pulso de ultra-som adquiridos na rotina de aquisição. Ao final desta rotina os valores calculados são mostrados no LCD.

A rotina começa com o cálculo dos componentes do leite através das curvas de calibração para leite natural.

Depois de realizados os cálculos, os valores de concentração de gorduras, extrato seco desengordurado, água adicionada e proteínas são salvos na memória *flash* do microcontrolador, para que posteriormente possam ser impressos (função GUARDA-VOLUMES).

Em seguida é lido na memória *flash* do microcontrolador o índice da última leitura, o qual é incrementado, salvo novamente na *flash* e mostrado no *display*.

Também dentro da função CALCULA são mostrados os resultados da análise no LCD do protótipo, como pode ser visto na Figura 43.

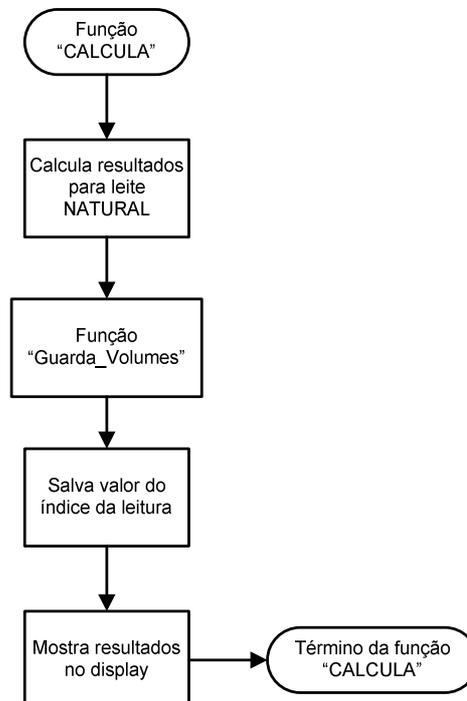


Figura 42 - Função Calcula.

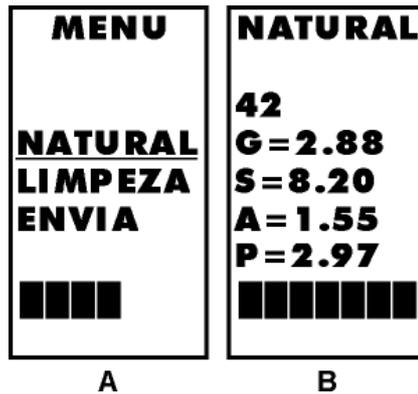


Figura 43 - Uma análise de leite natural foi escolhida. Durante a análise, uma barra de progresso indica o aquecimento da amostra (A). Resultados provenientes de uma análise de leite NATURAL (B). São mostrados no LCD o tipo de análise (NATURAL), o índice da análise (42) e os valores calculados de gorduras totais (G), extrato seco desengordurado (S), água adicionada (A) e proteínas (P).

3.4.9 Função GUARDA VOLUMES

Esta função é responsável por salvar os valores de gordura, extrato seco desengordurado, água adicionada e proteínas na memória *flash* do microcontrolador.

A função GUARDA-VOLUMES está representada na Figura 44. No início desta rotina é lido o índice da última análise na memória *flash* do microcontrolador. Se este índice apresentar o valor -INF (no caso do protótipo estar realizando a primeira análise, pois quando apagada, todas as posições da *flash* são configuradas com valores FFFFh) ele é zerado. Se for maior que 200, o índice é zerado e os setores da memória onde são salvos os resultados são apagados, fazendo com que os resultados sejam salvos novamente no início do setor da memória.

A seguir, cada resultado calculado é salvo na memória *flash*, nesta ordem, gorduras (G), extrato seco desengordurado (ESD), água adicionada (H2O) e proteínas (PROT). Ao fim da rotina, o índice da análise é salvo.

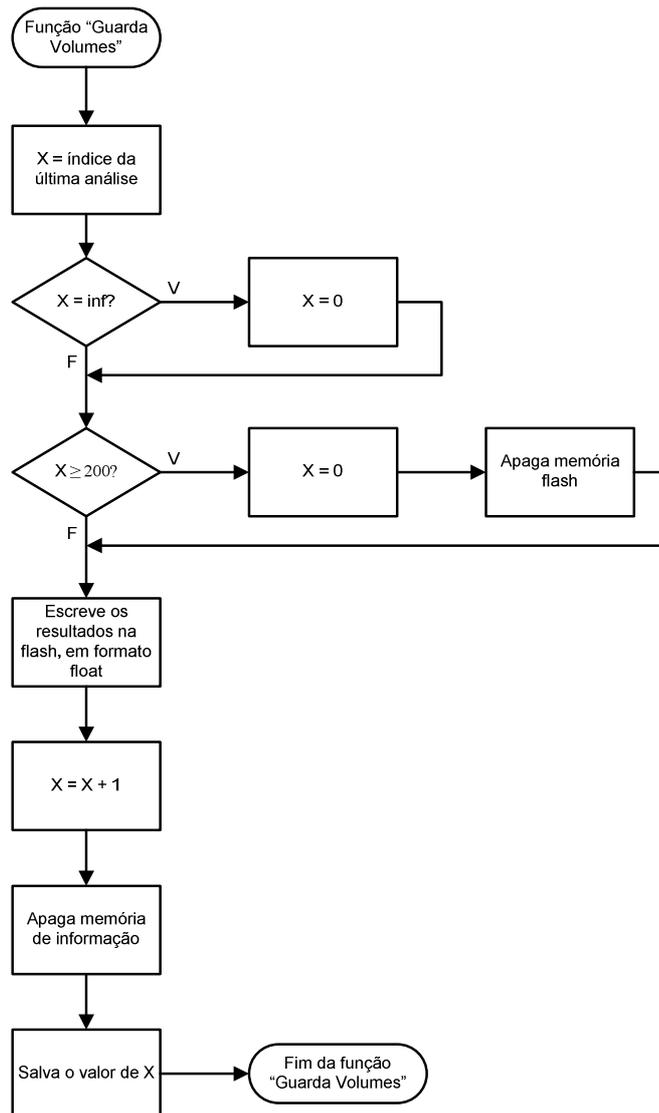


Figura 44 - Função guarda-volumes.

3.5 VERIFICAÇÃO DA REPRODUTIBILIDADE DO SISTEMA PARA MEDIÇÕES DE AMPLITUDE E TEMPO DE PROPAGAÇÃO DE PULSOS DE ULTRA-SOM

A fim de verificar a variabilidade das medições da amplitude e tempo de propagação dos pulsos de ultra-som medidos pelo sistema, foram testadas amostras de água, provenientes da rede municipal de abastecimento.

Ao fazer diversas leituras consecutivas, notou-se que os valores de tempo de propagação eram cada vez menores, enquanto as medidas de amplitude dos pulsos variavam ao redor de um valor médio.

Depurando-se o equipamento, verificou-se que este erro de medição era devido ao aquecimento interno do protótipo. Desta forma, foi levantada uma curva de compensação, visando corrigir este mau comportamento do aparelho.

A fim de avaliar o desempenho do protótipo, foram calculados a média (\bar{x}), desvio padrão (DP) e coeficiente de variação (CV) dos dados colhidos. A média e desvio padrão são dados pelas Equações 35 e 36, respectivamente:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (35)$$

$$DP = \sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (36)$$

onde:

- N é o número de amostras;
- X_i é cada uma das amostras ($i = 1$ a N);

O Coeficiente de Variação, que pode ser interpretado como a variabilidade dos dados em relação à média, é dado em porcentagem pela Equação 37.

$$CV = \left(\frac{DP}{\bar{x}} \right) \cdot 100 \quad (37)$$

onde:

- DP é o desvio padrão do conjunto de dados;
- \bar{x} é a média dos dados coletados.

O Coeficiente de Variação (CV) é utilizado para avaliar o desvio padrão de medições sem levar em conta a ordem de grandeza das variáveis estudadas. O CV pode ser interpretado como a variabilidade das medições em relação à média e é considerado baixo (sistema homogêneo) quando for menor que 10%, médio se estiver entre 10% e 20%, alto para valores entre 20% e 30% e muito altos para valores maiores que 30%.

3.6 LEVANTAMENTO DAS CURVAS DE CALIBRAÇÃO DO PROTÓTIPO

O método de caracterização de materiais, basicamente, consiste em medir seus parâmetros acústicos e correlacioná-los às propriedades físico-químicas do material sob teste (McCLEMENTS, 1995).

Esta correlação pode ser feita tanto usando equações que descrevem a propagação do som através destes materiais quanto levantando curvas de calibração que relacionam algum parâmetro acústico a alguma propriedade físico-química. Neste trabalho o último método foi utilizado e é descrito a seguir.

O processo de levantamento das curvas de calibração começou com a preparação, em diversos recipientes, das amostras de leite a serem testadas. Em seguida, parte de cada amostra foi enviada ao Laboratório Centralizado de Análise de Leite (LCAL) da Associação Paranaense de Bovinos da Raça Holandesa a fim de ser analisado em um equipamento comercial de análise de leite, o qual foi utilizado como referência. A outra parte de cada amostra foi analisada pelo protótipo desenvolvido, o qual retorna valores de amplitude e tempo de propagação de pulsos de ultra-som em cada amostra.

O laboratório de análise de leite utiliza o Bentley 2000, fabricado pela Bentley Instruments, a fim de avaliar as amostras. Este equipamento é um sistema de análise de leite que mede a absorção de energia na região de infravermelho médio e calcula valores de quantidade de gorduras, proteínas, lactose e sólidos totais.

A fim de medir a quantidade de água adicionada às amostras, foi utilizado o LK-7000, da Laktron Indústria Eletrônica LTDA. Este é um crioscópio microprocessado que calcula a quantidade de água adicionada ao leite através da medição do índice crioscópico da amostra analisada (LAKTRON, 2003).

3.6.1 Curvas de calibração para leite natural não-homogeneizado

As amostras de leite foram adquiridas de uma fazenda de Ponta Grossa. O leite foi produzido por vacas da raça Holandesa.

As amostras foram preparadas diluindo o leite em diversas proporções. Cada amostra foi preparada em um recipiente e analisada logo em seguida. Foram utilizadas para o levantamento de curvas de calibração para leite não-homogeneizado as amostras listadas a seguir:

- Leite puro, a1 (120ml);
- Leite diluído, a2 (120ml de leite + 5ml de água);
- Leite diluído, a3 (120ml de leite + 10ml de água);
- Leite diluído, a4 (120ml de leite + 15ml de água);
- Leite diluído, a5 (120ml de leite + 20ml de água);
- Leite diluído, a6 (120ml de leite + 25ml de água);
- Leite diluído, a7 (120ml de leite + 30ml de água);
- Leite diluído, a8 (120ml de leite + 35ml de água);
- Leite diluído, a9 (120ml de leite + 40ml de água);
- Leite diluído, a10 (120ml de leite + 45ml de água);

As amostras foram preparadas com volume suficiente para fazer quatro leituras no protótipo (a fim de fazer uma média entre os valores), uma leitura no LK-7000 e uma análise no LCAL.

Os valores obtidos do protótipo foram relacionados aos resultados das análises e as curvas que descrevem o comportamento dos parâmetros acústicos com a variação da composição do leite foram traçadas utilizando-se o software Microsoft Excel[®] 2003. Foram obtidas as curvas de regressão, coeficientes de correlação e o erro padrão da estimativa (EPE), obtido pela Equação 37, para cada uma das curvas de calibração. Foram relacionados valores de EST e gordura versus amplitude e ESD e água adicionada versus tempo de propagação.

$$EPE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - y_{iest})^2}{N}} \quad (38)$$

onde:

- y_i é o valor medido;
- y_{iest} é o valor estimado pela curva de regressão
- N é o número de medições realizadas.

3.7 COMPARAÇÃO DOS TESTES FEITOS ENTRE O SISTEMA DESENVOLVIDO E O ANALISADOR COMERCIAL

Após o processo de calibração do sistema, foram feitos testes com o objetivo de comparar os resultados obtidos de um aparelho de análises comercial e o protótipo desenvolvido.

Para isso, foram conseguidas novas amostras de leite, desta vez adquiridas de uma chácara da Colônia Mergulhão, situada no município de São José dos Pinhais. Este foi produzido por vacas da raça Holandesa.

Novamente, as amostras foram preparadas diluindo o leite em diversas proporções. Cada amostra foi preparada em um recipiente e analisada logo em seguida. Foram utilizadas para a comparação entre o protótipo e os aparelhos utilizados como referência as amostras listadas a seguir:

- Leite puro, a1 (120ml);
- Leite diluído, a2 (120ml de leite + 5ml de água);
- Leite diluído, a3 (120ml de leite + 10ml de água);
- Leite diluído, a4 (120ml de leite + 15ml de água);
- Leite diluído, a5 (120ml de leite + 20ml de água);
- Leite diluído, a6 (120ml de leite + 25ml de água);
- Leite diluído, a7 (120ml de leite + 30ml de água);
- Leite diluído, a8 (120ml de leite + 35ml de água);

As amostras foram preparadas com volume suficiente para fazer quatro leituras no protótipo, uma leitura no LK-7000 e uma análise no LCAL.

Com o conjunto de resultados foram calculadas a média, desvio padrão e coeficiente de variação para os dados provenientes do protótipo. Também foi calculado o erro percentual em relação aos valores obtidos por análise do LCAL. O erro percentual (e) é dado pela Equação 39.

$$e = \left(\frac{V_M - V_R}{V_R} \right) 100 \quad (39)$$

onde:

- VR é o Valor Real (valor obtido das análises no LCAL);
- VM é o Valor Medido pelo protótipo.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

Neste capítulo é apresentado o protótipo desenvolvido, além da descrição dos testes de reprodutibilidade, levantamentos das curvas de calibração e resultados da comparação entre leituras feitas com o protótipo e aparelhos comerciais de análise de leite.

4.1 PROTÓTIPO

A Figura 45 representa fotos do protótipo construído. Em (A) visualiza-se o teclado de membrana contendo os botões “MENU” e “OK” (indicado em 1), além do LCD (2) e entrada para amostras de leite (3). Em (B) está representada a parte traseira do protótipo, contendo a bomba peristáltica (4), chave liga-desliga (5), conector para alimentação do aparelho (6) e conector DB9 para comunicação com a mini-impressora (7).

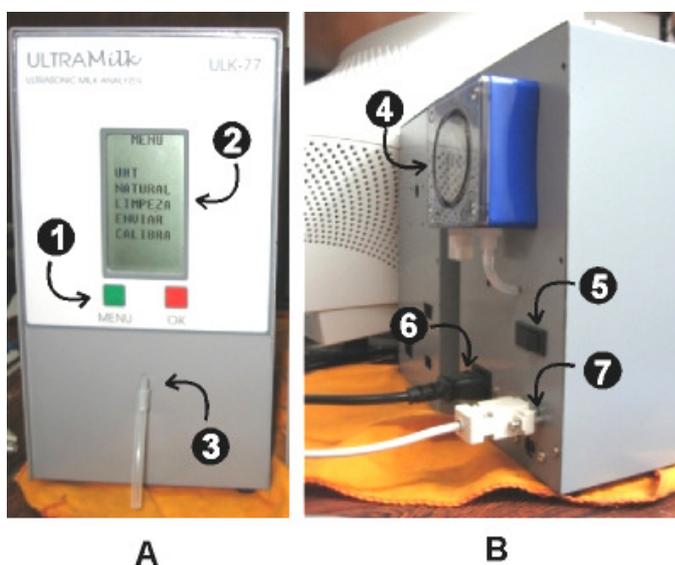


Figura 45 - Imagens do protótipo construído.

As Figuras 46 e 47 representam fotos da célula construída. Nestas, observa-se o aspecto construtivo da célula de testes. Na Figura 46, observam-se as camadas de retaguarda dos transdutores Emissor e Receptor (1 e 3), a PCI soldada ao tubo de latão (2), um dos

terminais KRE, onde é fixada uma extremidade da resistência que envolve a célula (4) e uma das barras de pinos (5).

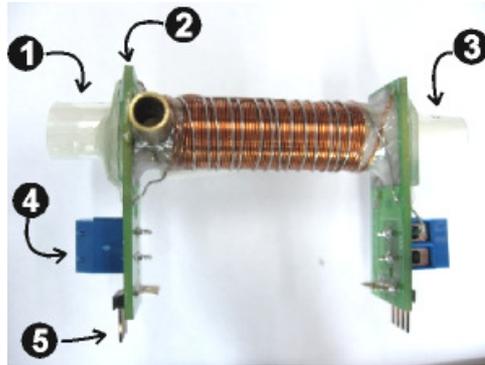


Figura 46 - Foto da célula construída.

Na Figura 47 é apresentada uma imagem com o detalhe do Transdutor Emissor (TE) da célula de testes. Aqui estão indicadas a placa de circuito impresso (PCI)(1), a resistência conectada ao terminal KRE (2) e uma das barras de pinos (3).

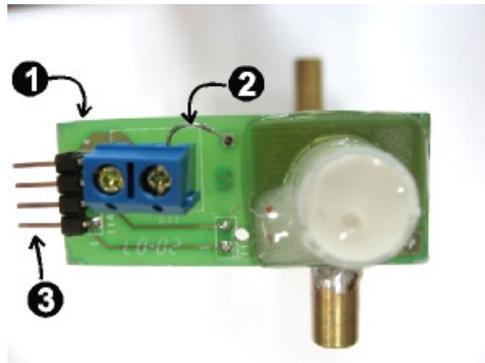


Figura 47 - Detalhe do Transdutor Emissor.

4.2 TESTES COM AS CÉLULAS

O circuito de excitação é responsável por gerar e enviar os pulsos de tensão negativos ao transdutor emissor da célula de testes. Na Figura 48, está representado o pulso de excitação na saída do estágio de potência. Em (A), o circuito de excitação opera “a vazio”, ou seja, sem que esteja ligado ao Transdutor Emissor. Já em (B), a célula está ligada ao circuito, o que é verificado pela distorção do pulso de excitação.

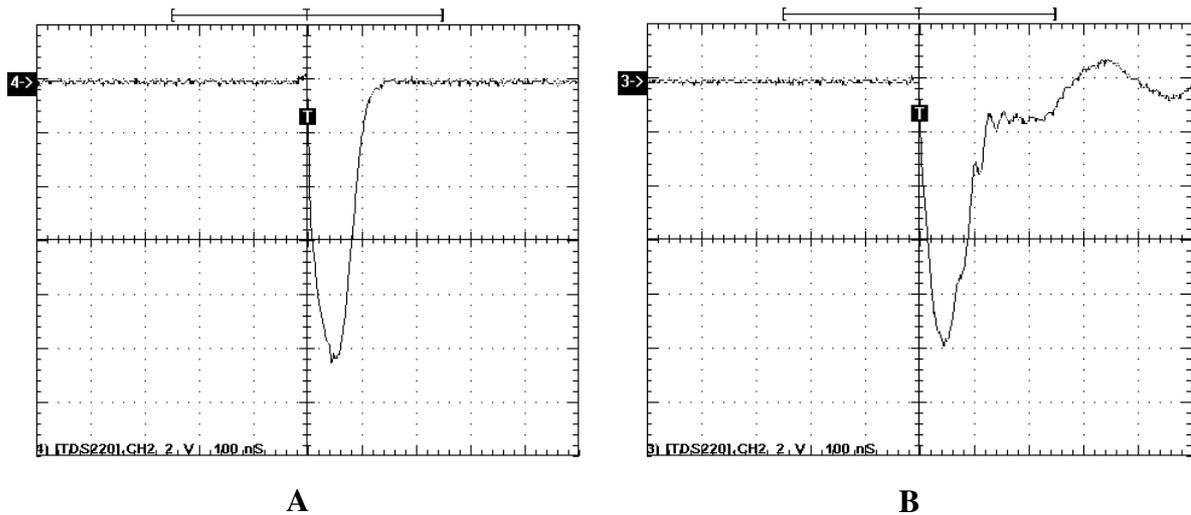


Figura 48 - Pulso do circuito de excitação a vazio (A) e pulso com circuito ligado ao transdutor emissor (B).

As Figuras 49, 50 e 51 foram adquiridas utilizando o software WaveStar 2.8 ligado a um osciloscópio TDS2022, ambos da Tektronix.

As Figuras 49 e 50 representam pulsos de ultra-som propagados através de água e recebidos pelo Transdutor Receptor de duas células construídas. Nestas figuras, observa-se a influência da camada de retaguarda sobre a produção de pulsos de ultra-som. Nas Figuras 49(A) e 50(A), as cerâmicas piezoelétricas estão coladas às respectivas camadas de compatibilização acústica, porém não existe camada de retaguarda. Observa-se nestas figuras que existe um segundo pulso, de menor amplitude, após o primeiro, de maior amplitude.

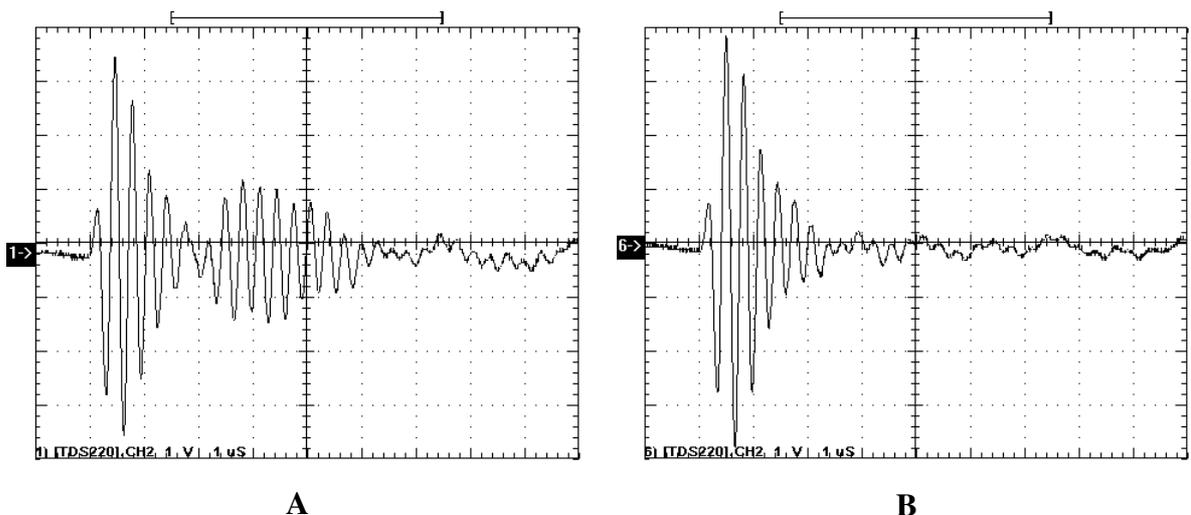


Figura 49 - Pulsos de ultra-som recebidos e amplificados para a Célula de Testes 1: sem camada de retaguarda (A) e com camada de retaguarda de epóxi e alumina (B).

Isto acontece devido à grande diferença entre a impedância acústica entre a cerâmica e o ar. Desta forma, boa parte da energia do pulso que é gerado pela parte traseira da cerâmica é refletida de volta para o interior da mesma, propagando-se em direção ao interior da célula de testes.

Nas Figuras 49(B) e 50(B) estão representados pulsos produzidos por transdutores completamente construídos, ou seja, já montados com a camada de retaguarda. Nota-se que os pulsos provenientes da parte traseira das cerâmicas foram bastante reduzidos ou totalmente eliminados. Isto ocorre, pois a camada de retaguarda absorve os pulsos produzidos pela parte traseira das cerâmicas.

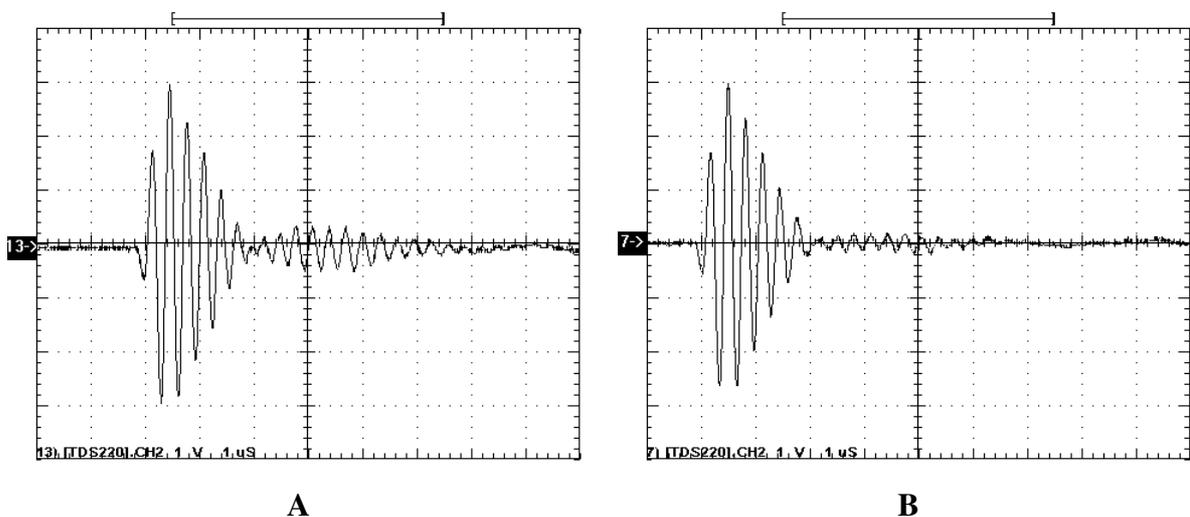


Figura 50 - Pulsos de ultra-som recebidos e amplificados para a Célula de Testes 2: sem camada de retaguarda (A) e com camada de retaguarda de epóxi e alumina (B).

A Figura 51 representa um pulso produzido por um transdutor construído de tal forma que a cerâmica não foi colada à camada de compatibilização e tampouco foi utilizada camada de retaguarda.

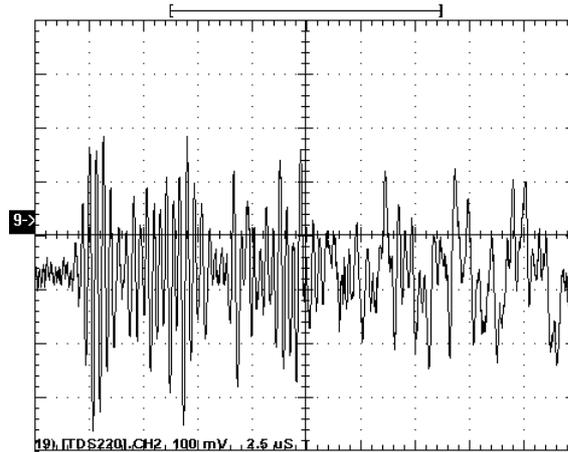


Figura 51 - Pulso de ultra-som recebido e amplificado. Este pulso foi gerado por um transdutor onde a cerâmica não foi colada à camada de retaguarda nem à de compatibilização acústica.

4.3 VERIFICAÇÃO DA REPRODUTIBILIDADE

A fim de avaliar a reprodutibilidade do protótipo construído, foram feitas medições dos valores de amplitude e tempo de propagação do pulso de ultra-som em amostras de água. A Tabela A1 (presente no Apêndice) apresenta os resultados obtidos de 25 leituras consecutivas. As amostras eram constituídas de água proveniente da rede de abastecimento municipal.

Ao fazer as medições da amplitude e tempo de propagação nestas amostras de água, notou-se que o protótipo media erroneamente o valor de tempo de propagação. À medida que leituras consecutivas eram realizadas, o protótipo calculava valores cada vez menores para o tempo de propagação do pulso pela mesma amostra de água, como pode ser visto na Tabela A1 (presente no Apêndice) e Figura 52.

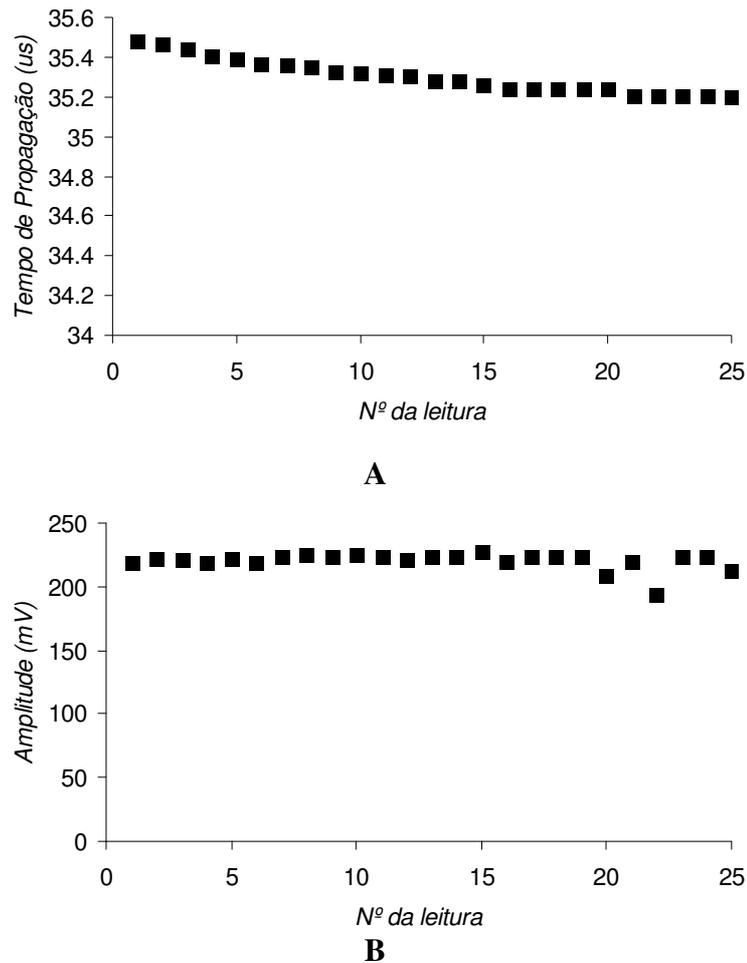


Figura 52 - Tempo de propagação em μs (A) e amplitude (B) do pulso de ultra-som ao se propagar por amostras de água.

Ao observar os dados reunidos, notou-se que a Razão entre o tempo de propagação medido pelo protótipo e o tempo de propagação real é proporcional à temperatura interna do protótipo. A Razão entre os tempos de propagação é melhor visualizada na Equação 40.

$$\text{Razão} = \frac{\text{Deslocamento Medido}}{\text{Deslocamento Real}} \quad (40)$$

Tendo em vista a variação das leituras de tempo de propagação, foi levantada uma curva de compensação, que relaciona a temperatura interna do aparelho à Razão entre o tempo de propagação real e o medido. A temperatura interna foi medida com o sensor embutido no μC . Foram medidos 92 pontos para o levantamento desta curva, que está representada na Figura 53. As medições para o levantamento desta curva foram feitas com a temperatura ambiente variando de 20°C a 23°C .

Após inserir a curva no *firmware* do protótipo, foi feito novo teste de 25 leituras consecutivas. Os dados estão reunidos na Tabela A1 (presente no Apêndice) e Figura 54.

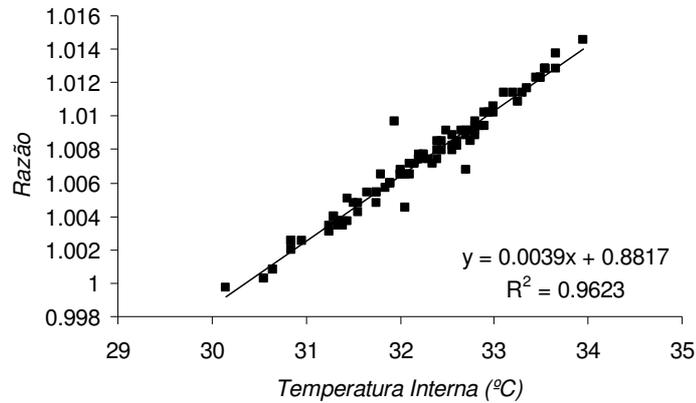
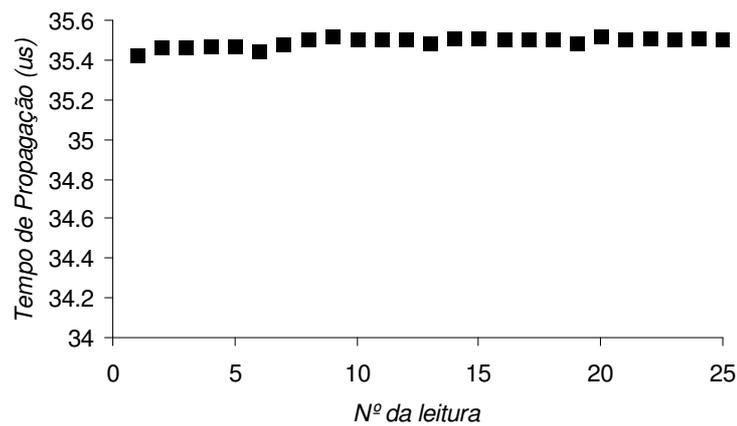
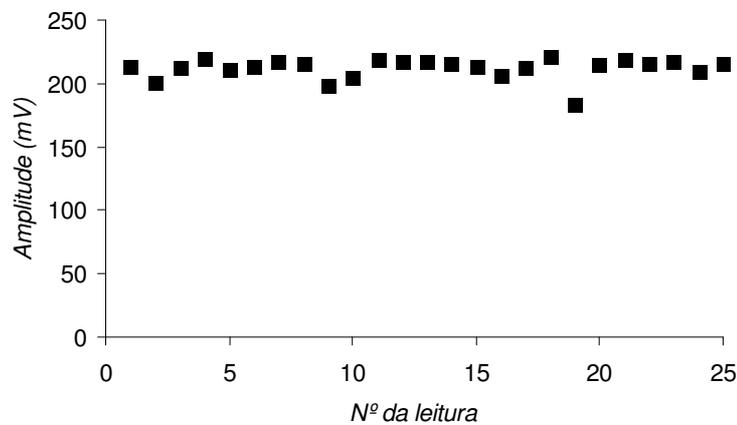


Figura 53 - Curva de compensação levantada. Este gráfico faz uma correlação entre a Razão entre os tempos de propagação medido e real e a temperatura interna do protótipo a fim de corrigir os erros nas medições de tempo de propagação devido ao aquecimento interno do equipamento.



A



B

Figura 54 - Valores de Tempo de Propagação (A) e Amplitude (B) dos pulsos de ultra-som aplicando-se a curva de compensação.

As Tabelas 4 e 5 reúnem a média, desvio padrão (DP) e Coeficiente de Variação (CV) para os valores de amplitude e tempo de propagação do pulso de ultra-som mostrados nas Tabelas A1 e A2, respectivamente.

Tabela 4 - Valores de média, desvio padrão (DP) e coeficiente de variação (CV) para leituras de amostras de água. Amp Medido e Desloc Medido correspondem aos valores de amplitude e tempo de propagação do pulso de ultra-som medidos pelo protótipo enquanto Amp Real e Desl Real correspondem aos valores obtidos do osciloscópio.

Sem a Aplicação da Curva de Compensação				
	Amp Medido (mV)	Desl Medido (μs)	Amp Real (mV)	Desl Real (μs)
Média	220,28	35,30	224,00	35,49
DP	6,88	0,08	0,00	0,01
CV (%)	3,12	0,24	0,00	0,02

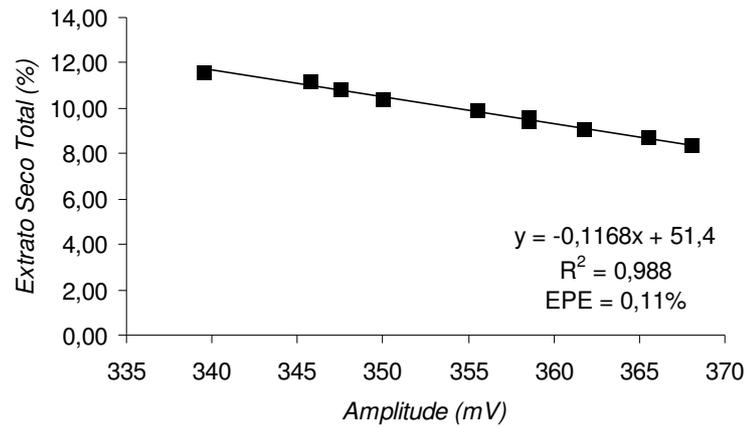
Tabela 5 - Valores de média, desvio padrão (DP) e coeficiente de variação (CV) para leituras de amostras de água. Amp Medido e Desloc Medido correspondem aos valores de amplitude e tempo de propagação do pulso de ultra-som medidos pelo protótipo enquanto Amp Real e Desl Real correspondem aos valores obtidos do osciloscópio.

Aplicando a Curva de Compensação				
	Amp Medido (mV)	Desl Medido (μs)	Amp Real (mV)	Desl Real (μs)
Média	212,16	35,49	223,68	35,49
DP	8,21	0,02	1,60	0,02
CV (%)	3,87	0,07	0,72	0,06

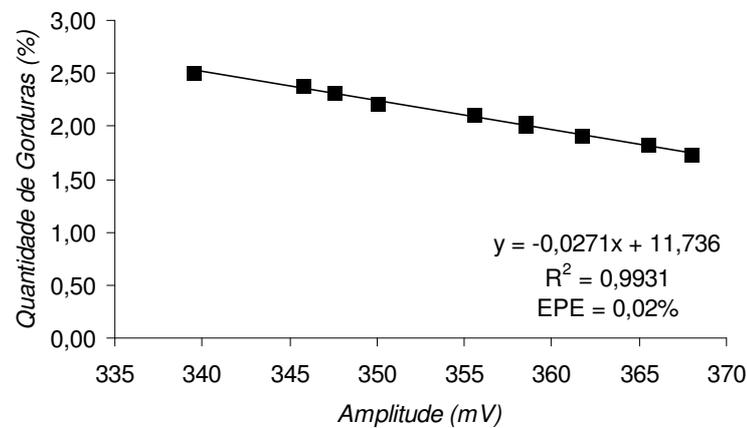
4.4 LEVANTAMENTO DAS CURVAS DE CALIBRAÇÃO PARA LEITE NÃO HOMOGENEIZADO

A partir dos dados da Tabela A4 foram traçadas curvas buscando relacionar as propriedades acústicas medidas no protótipo aos componentes do leite. Os gráficos a seguir representam as curvas traçadas.

Na Figura 55, as concentrações de EST e Gorduras estão relacionadas à amplitude do pulso de ultra-som. Observa-se que a amplitude do sinal se comporta de forma inversamente proporcional à concentração destes dois componentes, ou seja, quanto maior a quantidade de glóbulos de gordura dispersos na amostra, menor a amplitude do sinal, devido ao espalhamento e absorção pelo meio.



A

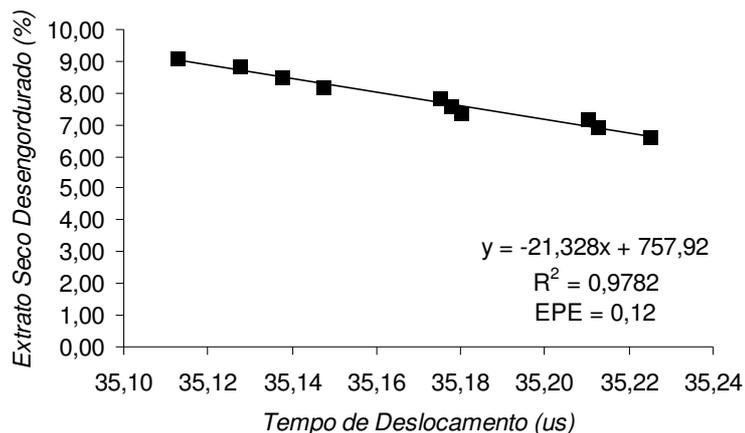


B

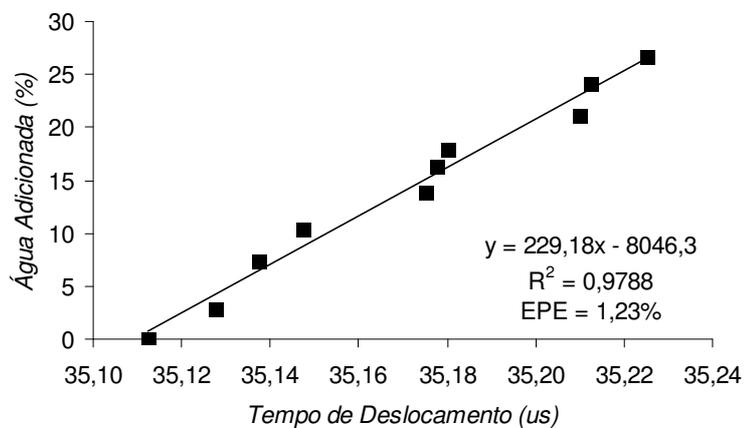
Figura 55 - Curvas traçadas representando a relação entre EST e amplitude (A) e Gorduras e amplitude do pulso de ultra-som (B).

Na Figura 56, as concentrações de ESD e Água Adicionada foram correlacionadas ao Tempo de Propagação do pulso de ultra-som, em μs . Observa-se que o Tempo de Propagação se comporta de forma inversamente proporcional à concentração de ESD, ou seja, a velocidade aumenta à medida que a porcentagem de ESD aumenta na amostra. No caso da Água Adicionada, o Tempo de Propagação aumenta com o acréscimo de água na amostra analisada.

A Figura 57 representa a curva traçada correlacionando a Quantidade de Proteínas das amostras ao Tempo de Propagação do pulso. Nota-se que o Tempo de Propagação aumenta à medida que diminui a quantidade de proteínas nas amostras.



A



B

Figura 56 - Curvas traçadas representando a relação entre ESD e Tempo de Propagação (A) e Água Adicionada e Tempo de Propagação do pulso de ultra-som (B).

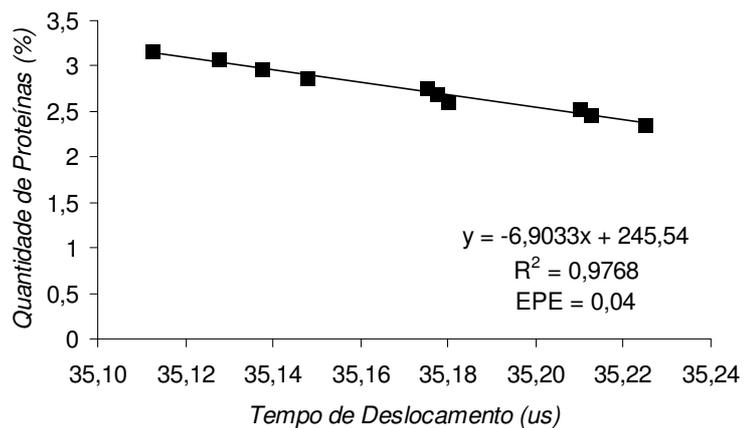


Figura 57 - Curva traçada representando a relação entre Quantidade de Proteínas e Tempo de Propagação do pulso de ultra-som.

4.5 COMPARAÇÃO ENTRE AS LEITURAS DO PROTÓTIPO E DO APARELHO COMERCIAL DE TESTES

Nesta etapa, foram preparadas amostras de leite a fim de realizar testes no protótipo desenvolvido e comparar as análises realizadas em um aparelho de testes comercial.

A Tabela 6 contém os resultados das análises realizadas no Laboratório Centralizado de Análise de Leite da Associação Paranaense de Bovinos da Raça Holandesa, que utiliza o Bentley 2000 para a análise das amostras.

Tabela 6 - Resultados obtidos de amostras de leite a partir de um aparelho comercial de análise. A coluna Quantidade de água adicionada se refere à porcentagem de água adicionada às amostras testadas.

	Quantidade de água medida(%)	Quantidade água adicionada(%)	Quantidade de gordura (%)	Quantidade de proteína (%)	Extrato Seco Desengordurado (%)
a1	3,70	0,00	3,19	2,91	8,36
a2	7,20	4,00	3,10	2,81	8,06
a3	9,30	7,69	2,96	2,73	7,79
a4	13,00	11,11	2,86	2,65	7,53
a5	17,40	14,29	2,76	2,58	7,29
a6	19,40	17,24	2,65	2,49	7,05
a7	21,90	20,00	2,58	2,41	6,81
a8	25,20	22,58	2,46	2,35	6,60

Cada amostra foi analisada quatro vezes no protótipo desenvolvido. A Tabela A5 reúne os resultados obtidos destas análises.

A partir dos dados reunidos na Tabela A5, foram calculados os valores das médias, desvio padrão, coeficiente de variação e erro percentual para as análises de cada amostra. Estes dados estão agrupados nas Tabelas 7, 8 e 9.

Tabela 7 - Média para os resultados das análises obtidas do protótipo.

	Quantidade de água (%)	Quantidade de gordura (%)	Quantidade de proteína (%)	Extrato Seco Desengordurado (%)
a1	20,28	2,84	2,55	7,21
a2	24,55	2,55	2,38	6,67
a3	24,86	2,68	2,44	6,85
a4	26,03	2,62	2,38	6,68
a5	29,06	2,55	2,29	6,39
a6	30,49	2,42	2,24	6,26
a7	34,36	2,31	2,13	5,89
a8	35,45	2,15	2,09	5,79

Tabela 8 – Desvio padrão para os resultados das análises obtidas do protótipo.

	Quantidade de água	Quantidade de gordura	Quantidade de proteína	Extrato Seco Desengordurado
a1	1,09	0,05	0,03	0,10
a2	4,04	0,24	0,15	0,47
a3	1,53	0,11	0,04	0,12
a4	2,15	0,05	0,07	0,20
a5	5,32	0,02	0,16	0,50
a6	2,65	0,06	0,08	0,25
a7	1,07	0,04	0,03	0,10
a8	1,30	0,06	0,04	0,12

Tabela 9 – Coeficiente de Variação para os resultados das análises obtidas do protótipo.

	Quantidade de água (%)	Quantidade de gordura (%)	Quantidade de proteína (%)	Extrato Seco Desengordurado (%)
a1	5,39	1,93	1,32	1,45
a2	16,45	9,43	6,43	7,01
a3	6,17	4,27	1,58	1,73
a4	8,24	1,95	2,80	3,01
a5	18,30	0,81	6,98	7,78
a6	8,71	2,55	3,48	3,94
a7	3,11	1,88	1,55	1,66
a8	3,67	2,82	1,85	2,12

Tabela 10 – Erro percentual calculado para os resultados das análises obtidas do protótipo.

	Quantidade de água	Quantidade de gordura	Quantidade de proteína	Extrato Seco Desengordurado
a1	448.04	-10.97	-12.37	-13.76
a2	241.01	-17.82	-15.48	-17.21
a3	167.31	-9.54	-10.71	-12.13
a4	100.19	-8.30	-10.28	-11.35
a5	66.98	-7.70	-11.34	-12.35
a6	57.18	-8.68	-9.94	-11.28
a7	56.88	-10.56	-11.72	-13.47
a8	40.66	-12.60	-10.96	-12.23

CAPÍTULO 5

DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

5.1 DISCUSSÕES

5.1.1 Testes com as Células

Na Figura 48 nota-se que o pulso de excitação tem amplitude e largura de aproximadamente 10V e 100ns, respectivamente. Estes valores estão de acordo com as especificações iniciais do projeto. A amplitude do pulso é um pouco inferior a 12V, porém suficiente para excitar a cerâmica.

Nas Figuras 49 e 50 estão destacados os pulsos de ultra-som recebidos pelos transdutores receptores das células de testes 1 e 2, respectivamente. Ao analisar estas figuras, nota-se a influência da camada de retaguarda sobre o pulso gerado. Os pulsos das Figuras 49A e 50A foram adquiridos com o transdutor emissor montado sem a camada de anteparo, logo após a fixação da cerâmica piezoelétrica à camada frontal. Observa-se que logo após o primeiro pulso, ocorre um segundo, de menor amplitude. Isto acontece, pois devido à grande diferença entre a impedância acústica do ar e da cerâmica, grande parte do pulso de ultra-som que é gerado para parte posterior da cerâmica retorna ao seu interior, ocasionando o fenômeno de reverberação. Com a colocação da camada de retaguarda, grande parte deste pulso gerado pela parte traseira da cerâmica é absorvido, diminuindo ou eliminando a reverberação, como era esperado e pode ser visto nas Figuras 49B e 50B. Na Figura 51 há o exemplo de um pulso de ultra-som gerado por um transdutor onde a cerâmica foi fixada à camada frontal sem a utilização de cola epóxi, e sem camada de retaguarda. Nota-se que a não-utilização de cola proporciona um desempenho inferior ao caso anterior, onde foi usado o fixador. Além da amplitude diminuta, o transdutor apresenta muita reverberação. Estes dois fenômenos podem ter sido causados tanto pelo mau acoplamento entre cerâmica e camada de retaguarda, quanto pela existência de ar entre a cerâmica e a camada frontal do transdutor.

5.1.2 Reprodutibilidade do Protótipo para Leituras de Amplitude e Tempo de Propagação dos pulsos de Ultra-Som

Ao observar os dados da Figura 52A, notou-se que o tempo de propagação medido pelo protótipo decrescia à medida que consecutivas medições eram realizadas. Comparando-se os dados da Tabela 4, nota-se que, apesar do baixo Coeficiente de Variação (0,24%), a média do tempo de propagação medido é diferente do tempo de propagação real, respectivamente 35,3 μ s e 35,49 μ s.

Depurando o aparelho, constatou-se que a razão entre o tempo de propagação real e o tempo de propagação medido era proporcional à temperatura interna do protótipo.

Desta forma, foi levantada uma curva de compensação, com o intuito de corrigir este erro de medição. Aplicando-se a curva no *firmware* do protótipo e realizando nova série de 25 leituras, obtiveram-se os dados da Tabela A2 (presente no Apêndice) e Figura 54. Inicialmente, verifica-se que o tempo de propagação medido não diminui à medida que as 25 leituras são feitas. Nos dados reunidos na Tabela 5 nota-se que os valores das médias do tempo de propagação medido e real são iguais (35,49 μ s), além de ter reduzido o CV do tempo de propagação medido (0,07%).

Em relação à amplitude do sinal, nenhuma correção foi feita, já que não foi notada qualquer tendência de variação dentro das 25 leituras.

5.1.3 Comparação entre Análises Feitas com o Protótipo e um Analisador Comercial

A Tabela 6 reúne os resultados das análises de oito amostras de leite integral cru. Cada amostra foi produzida em quantidade suficiente para realizar os testes em laboratório e fazer quatro análises no protótipo e uma no crioscópio. A Tabela A5 (presente no Apêndice) agrupa os resultados provenientes das análises do protótipo.

A partir da Tabela A5, foram calculadas as médias, desvios padrão, coeficientes de variação e erros percentuais, reunidos nas Tabelas 7 a 10.

Analisando as Tabelas 8 e 9, verifica-se que os maiores desvios padrão e coeficientes de variação foram obtidos para as análises das amostras a2 e a5. Isto indica que pode ter acontecido algum erro de medição para estas amostras durante as análises, tal como a presença de bolhas no interior da célula de testes. Este tipo de problema pode ser remediado implementando pequenas alterações na célula de testes.

Na Tabela 8, os maiores desvios padrão para quantidade de água adicionada, gorduras, proteínas e extrato seco desengordurado são respectivamente 5,32, 0,24, 0,16 e 0,5. Levando-se em conta a ocorrência de erros de medição nas amostras a2 e a5 e descartando-se estes erros, os maiores desvios padrão seriam reduzidos a 2,65; 0,11; 0,07 e 0,25, para os mesmos componentes.

Para a Tabela 9, os maiores coeficientes de variação para quantidade de água, gorduras, proteínas e extrato seco desengordurado seriam respectivamente 18,3%; 9,43%; 6,98% e 7,78%. Levando-se em conta a existência de erros durante as medições das amostras a2 e a5, os coeficientes seriam reduzidos a 8,71%; 4,27%; 3,48% e 3,94%. Nota-se que, considerando a possibilidade de ocorrência de erro de leitura para as amostras a2 e a5, todas as medições apresentam CV menores que 8,8%; 4,3%, 3,5% e 4% para quantidade de água adicionada, gorduras, proteína e ESD, respectivamente, indicando que o protótipo apresenta baixa variabilidade nas análises de amostras de leite.

Analisando a Tabela 10, observa-se que os maiores erros percentuais foram -17,82% (amostra a2) para quantidade de gorduras, -15,48% (a2) para proteínas e -17,21% (a2) para quantidade de extrato seco desengordurado. Considerando que tenha ocorrido algum erro de medição na amostra a2, os erros percentuais para quantificação de quantidade de gorduras, proteínas e extrato seco desengordurado seriam reduzidos a -12,6%, -12,37% e -13,76%, respectivamente. Valores de um analisador comercial de leite por ultra-som apresenta erros da ordem de 0,1%, 0,2% e 0,2% (BULTEH, 2000).

Os dados da Tabela 6 indicam que a amostra a1, à qual não foi adicionada água durante os testes, apresentou, através de leitura no crioscópio, uma quantidade de 3,7% de água adicionada. Isto indica que pode ter ocorrido algum problema durante o processo de ordenha. Como o processo de coleta do leite não foi acompanhado, não há como saber se existia água ou algum outro tipo de líquido dentro do recipiente utilizado na ordenha. Dentro do recipiente poderiam existir resíduos de substâncias como ácidos e enzimas, que podem desnaturar proteínas e acelerar o processo de deterioração, alterando a composição e características físicas do leite.

Analisando as curvas de calibração obtidas (Figuras 55, 56 e 57), nota-se que todas apresentam coeficientes de determinação da regressão linear (R^2) superiores a 97%, indicando um bom ajuste dos pontos obtidos experimentalmente em relação às curvas de regressão linear obtidas. Além disso, os erros padrão de estimativa obtidos são baixos: 0,02% para quantificação de gorduras; 0,12% para ESD; 0,04% para proteínas e 1,23% para água adicionada, indicando que a dispersão dos dados em relação à reta de calibração utilizada é

pequena. Mesmo apresentando curvas de calibração com ajuste muito bom, a comparação entre os resultados obtidos no protótipo e os equipamentos de referência apresenta erros percentuais superiores a 10%. Isto provavelmente se deve ao fato do leite utilizado na calibração não ser fresco. O leite usado na calibração foi obtido de uma fazenda do município de Ponta Grossa, no dia anterior ao procedimento de calibração. Não se sabe em quais condições o leite foi armazenado e transportado e, sem a adição de conservantes, pasteurização ou algum método de refrigeração adequado, o leite pode entrar em processo de deterioração, onde ocorrem coagulação e aglutinação de proteínas e separação da fase gordurosa da fase líquida do leite. Estas mudanças acarretam em alterações nas propriedades acústicas do leite. Para a realização dos testes comparativos entre o sistema desenvolvido e as análises de laboratório, foram usadas amostras de leite colhidas na mesma manhã da realização dos experimentos. Assim, o leite utilizado para a calibração estava em um estado avançado de decomposição em relação às amostras utilizadas nos testes comparativos, e isto ocasiona erros nas medições feitas pelo protótipo. O problema de utilizar amostras diferentes para calibração e testes de comparação entre protótipo e analisador comercial, além da pequena quantidade de amostras de leite empregadas se deve ao fato de ser bastante difícil encontrar produtores de leite na cidade onde foi realizado o trabalho, Curitiba – PR.

Outro fato a ser observado é que os leites utilizados para calibração e comparação entre aparelhos podem ter sido resultado de ordenha de uma única vaca. A composição e características físicas do leite dependem de vários fatores como alimentação do gado, raça e período de lactação do bovino. Assim, a calibração do aparelho deveria ter sido feita utilizando-se leite de conjunto, ou seja, leites obtidos da ordenha de diversas vacas e reunidos em um único recipiente, representando uma média para os tipos de leite, o que resultaria em curvas de calibração mais confiáveis.

A quantificação de água apresentou erros percentuais bem superiores aos demais parâmetros avaliados, na faixa entre 40% e 449%, ou seja, até 5 vezes maior que o valor medido no equipamento utilizado como referência. No entanto, analisando-se o gráfico que mostra a curva de calibração entre o tempo de propagação da onda ultra-sônica na amostra e a quantidade de água presente na mesma (Figura 56B), pode-se verificar que o erro padrão da estimativa da quantidade de água adicionada é baixo (1,23%). Isto reforça a hipótese de que houve problemas no processo de calibração do equipamento ao se utilizar amostras de leite de apenas um animal. Portanto, se for utilizado um número maior de amostras de leite durante o processo de calibração do protótipo, incluindo animais de diferentes raças e em diferentes períodos de lactação, os resultados serão mais confiáveis.

Também devem ser levados em consideração os erros de medida apresentados pelos aparelhos utilizados como referência. Nos manuais e *folders* disponíveis, são apresentados coeficientes de variação e repetitividade, mas não os erros de medição. Desta forma, não há como prever os erros propagados para o processo de calibração.

É importante notar que mesmo apresentando erros de calibração, o protótipo construído é capaz de quantificar diferentes componentes presentes em amostras de leite utilizando, para isto, a medição de dois parâmetros acústicos: amplitude e tempo de propagação de pulsos de ultra-som a uma dada temperatura. PRIEV et al (2005) propuseram um sistema de medição no qual cada componente do leite foi correlacionado a um parâmetro acústico diferente, ou seja, para quatro componentes do leite, foram medidos quatro parâmetros acústicos. Desta forma, a medição de mais dois parâmetros pode melhorar o desempenho do protótipo construído.

5.2 CONCLUSÕES

O desenvolvimento do protótipo analisador de líquidos por ultra-som dividiu-se em duas partes: projeto, desenvolvimento e testes dos circuitos eletrônicos responsáveis pelo controle dos sistemas, aquisição dos sinais de ultra-som, controle da sucção e aquecimento das amostras e calibração e testes comparativos entre o protótipo e um analisador comercial de leite.

Ao fazer testes utilizando amostras de água, observou-se que o sistema apresenta boa reprodutibilidade dos dados ao medir a amplitude e tempo de propagação dos pulsos de ultra-som, apresentando baixos Coeficientes de Variação (abaixo de 4% para amplitude e 0,5% para tempo de propagação).

As curvas de calibração para quantificação dos componentes apresentaram ajuste muito bom aos dados experimentais, com coeficientes de determinação da regressão linear superiores a 97% ($R^2 > 0,97$). Além disso, os pontos apresentaram uma dispersão pequena ao redor das retas de regressão, já que os erros padrão de estimativa (EPE) foram inferiores a 1,25%.

As análises de amostras de leite feitas pelo sistema apresentaram baixa variabilidade (coeficientes de variação inferiores a 8,8%) e erros percentuais absolutos máximos de 12,6%, 12,37% e 13,76% para a quantificação de gorduras, proteínas e extrato seco desengordurado, respectivamente.

Para a quantificação de água, os erros foram superiores aos apresentados pelas análises dos componentes sólidos, mesmo que as curvas de calibração tenham apresentado um ajuste adequado aos dados experimentais. Isto leva a crer que estes erros são devidos ao processo de calibração, no qual foram utilizadas amostras de leite provenientes de um único animal. Ao elevar o número de amostras, o que inclui conseguir leite de diversas raças – aumentando a quantidade de amostras com composições diferentes – o processo de calibração se tornaria mais confiável, o que levaria a uma redução nos erros apresentados pelo sistema para quantificação de componentes.

Em função dos resultados preliminares obtidos, pode-se concluir que o sistema de ultrassom desenvolvido é adequado para a quantificação dos principais componentes de leite bovino, a não ser a quantidade de água adicionada, e após a calibração apropriada, o mesmo poderá gerar um produto seguro e eficaz para avaliar a qualidade do leite bovino.

5.3 TRABALHOS FUTUROS

5.3.1 Realizar calibrações para outros líquidos

O sistema desenvolvido pode ser utilizado para caracterizar líquidos, tais como leite de caprinos, sucos, óleos e combustíveis. Para este fim, basta levantar as propriedades acústicas destes materiais e correlacioná-los a produtos com composição conhecida, realizando novos processos de calibração.

5.3.2 Realizar Novo Processo de Calibração

Calibrar o sistema com um número maior de amostras de leite, provenientes de diversas raças, diferentes produtores e ordenhadas de animais que estejam em períodos de lactação diversos.

Também é interessante avaliar outros métodos de determinação dos componentes do leite, pois outros métodos podem apresentar erros menores se comparados aos aplicados neste trabalho. Dentro deste contexto, podem ser medidos parâmetros acústicos em duas ou mais temperaturas, os quais podem ser correlacionados aos componentes presentes no leite bovino.

5.3.3 Construção de Uma Célula que Permita Fazer Espectroscopia por Ultra-Som

Construindo uma célula que apresente um pulso de ultra-som mais estreito, que apresente por sua vez uma banda de frequências mais larga, é possível construir um sistema de espectroscopia por ultra-som numa faixa de frequências de poucos Hertz até 40MHz, já que o sistema de aquisição possibilita amostragem até esta frequência.

Com um sistema de espectroscopia por ultra-som, é possível avaliar a homogeneidade de amostras, distribuição do tamanho de glóbulos de gordura em emulsões além de composição de sistemas heterogêneos.

APÊNDICE – TABELAS COM DADOS LEVANTADOS

Este item contém dados colhidos durante os testes do sistema desenvolvido. A Tabela A1 reúne dados de amplitude e tempo de propagação de pulsos de ultra-som propagados por amostras de água, obtidos durante os testes de reprodutibilidade do sistema.

Tabela A1 - Sucessivas leituras utilizando água a fim de observar a reprodutibilidade do protótipo. A coluna N° corresponde ao número da amostra; Temp Amostra é a temperatura da amostra internamente à célula; Amp Medido e Desloc Medido correspondem aos valores de amplitude e tempo de propagação do pulso ultra-som medidos pelo protótipo enquanto Amp Real e Desl Real corresponde aos valores obtidos do osciloscópio; Temp Protótipo é a temperatura interna do protótipo, medida com o sensor embutido no microprocessador e Razão é o valor obtido da divisão entre Desl Real e Desl Medido.

N°	Temp Amostra (°C)	Amp Medida (mV)	Desl Medido (µs)	Amp Real (mV)	Desl Real (µs)	Temp Protótipo (°C)	Razão
1	43,3	219	35,48	224	35,47	30,2	0,999718
2	43,1	222	35,46	224	35,47	30,6	1,000282
3	43,1	221	35,44	224	35,47	30,6	1,000847
4	43,2	219	35,41	224	35,48	30,8	1,001977
5	43,3	222	35,39	224	35,48	31	1,002543
6	43,2	219	35,37	224	35,48	31,3	1,00311
7	43,1	223	35,36	224	35,48	31,2	1,003394
8	43,3	225	35,35	224	35,48	31,5	1,003678
9	43,2	223	35,33	224	35,48	31,6	1,004246
10	43	225	35,32	224	35,49	31,6	1,004813
11	43,2	223	35,31	224	35,48	31,8	1,004815
12	43,2	221	35,3	224	35,49	31,8	1,005382
13	42,7	223	35,28	224	35,49	31,9	1,005952
14	43,1	224	35,28	224	35,49	31,9	1,005952
15	43,2	227	35,26	224	35,49	32	1,006523
16	43,2	220	35,24	224	35,49	32,1	1,007094
17	43,4	223	35,24	224	35,49	32,1	1,007094
18	43,2	223	35,24	224	35,49	32,2	1,007094
19	43,3	224	35,24	224	35,48	33,2	1,00681
20	43,2	209	35,24	224	35,49	32,4	1,007094
21	43,3	220	35,21	224	35,49	32,4	1,007952
22	43,3	193	35,21	224	35,49	32,5	1,007952
23	43,1	223	35,21	224	35,5	32,7	1,008236
24	43,2	224	35,21	224	35,5	32,6	1,008236
25	43,1	212	35,2	224	35,5	32,7	1,008523

A partir dos dados da Tabela A1 observou-se que o sistema media de forma errônea os tempo de propagação dos pulsos. Após a aplicação de uma curva de compensação, foram feitas novas leituras para amostras de água, as quais estão reunidas na Tabela A2.

Tabela A2 - Sucessivas leituras utilizando água a fim de observar a reprodutibilidade do protótipo. A coluna N° corresponde ao número da amostra; Temp Amostra é a temperatura da amostra internamente à célula; Amp Medido e Desloc Medido correspondem aos valores de amplitude e tempo de propagação do pulso ultra-som medidos pelo protótipo enquanto Amp Real e Desl Real corresponde aos valores obtidos do osciloscópio; Temp Protótipo é a temperatura interna do protótipo, medida com o sensor embutido no microprocessador e Razão é o valor obtido da divisão entre Desl Real e Desl Medido.

N°	Temp Amostra (°C)	Amp Medida (mV)	Desl Medido (µs)	Amp Real (mV)	Desl Real (µs)
1	44,5	213	35,42	224	35,46
2	44,3	201	35,46	224	35,47
3	44,6	212	35,46	224	35,49
4	44,4	220	35,47	224	35,48
5	44,1	211	35,47	224	35,48
6	44,1	214	35,45	224	35,49
7	44,4	217	35,48	224	35,49
8	44,3	216	35,5	224	35,5
9	44,2	199	35,52	224	35,5
10	44,4	205	35,5	224	35,49
11	44,2	218	35,5	224	35,49
12	44,1	217	35,5	224	35,49
13	44,2	217	35,49	224	35,49
14	44,3	216	35,51	224	35,49
15	44,2	214	35,51	224	35,49
16	44,3	206	35,5	224	35,49
17	44,2	212	35,5	224	35,49
18	44,1	221	35,5	224	35,5
19	44,1	183	35,49	216	35,49
20	44,2	215	35,52	224	35,49
21	44,1	218	35,5	224	35,49
22	44,2	216	35,51	224	35,59
23	44,3	217	35,5	224	35,49
24	44,3	210	35,51	224	35,49
25	44,2	216	35,5	224	35,49

A Tabela A3 reúne parâmetros acústicos medidos das amostras de leite utilizadas para a calibração do sistema.

Tabela A3 - Parâmetros acústicos obtidos das amostras de leite com o auxílio do protótipo construído.

Amostras	Amplitude (mV)	Tempo de Propagação (μs)
a1	343	35,11
a1	337	35,11
a1	340	35,11
a1	338	35,12
a2	344	35,13
a2	348	35,12
a2	347	35,12
a2	344	35,14
a3	347	35,12
a3	346	35,13
a3	348	35,14
a3	349	35,16
a4	356	35,15
a4	348	35,15
a4	347	35,14
a4	349	35,15
a5	357	35,18
a5	356	35,16
a5	355	35,18
a5	354	35,18
a6	356	35,19
a6	361	35,17
a6	359	35,18
a6	358	35,17
a7	358	35,19
a7	356	35,18
a7	361	35,17
a7	359	35,18
a8	357	35,22
a8	361	35,21
a8	365	35,19
a8	364	35,22
a9	369	35,21
a9	364	35,2
a9	365	35,22
a9	364	35,22
a10	369	35,2
a10	367	35,23
a10	368	35,23
a10	368	35,24

As médias dos parâmetros acústicos das amostras de leite da Tabela A3 foram reunidos na Tabela A4 juntamente com os resultados das análises de laboratório. A partir destes dados foram plotados gráficos correlacionando os parâmetros acústicos à composição das amostras de leite utilizadas.

Tabela A4 - Média dos valores para cada tipo de leite apresentado na Tabela A3. Os parâmetros acústicos foram medidos a partir do protótipo construído, enquanto as concentrações dos componentes do leite foram obtidos a partir de analisadores comerciais. Os valores de porcentagem de Gorduras, ESD e Proteínas foram obtidos do Bentley 2000 enquanto a porcentagem de Água Adicionada foi obtida LK-7000.

Amostra	Amplitude (mV)	Tempo de Propagação (μs)	Água Adicionada (%)	Quantidade de Gorduras (%)	Quantidade de Proteínas (%)	Quantidade de Lactose (%)	Sólidos Totais (%)	ESD (%)
a1	339,5	35,11	0	2,50	3,16	4,93	11,58	9,08
a2	345,75	35,13	2,8	2,38	3,08	4,79	11,22	8,84
a3	347,5	35,14	7,4	2,32	2,98	4,6	10,83	8,51
a4	350	35,15	10,4	2,22	2,87	4,4	10,40	8,18
a5	355,5	35,18	13,9	2,11	2,77	4,2	9,95	7,84
a6	358,5	35,18	16,3	2,04	2,69	4,06	9,63	7,59
a7	358,5	35,18	18	2,00	2,61	3,97	9,40	7,40
a8	361,75	35,21	21,1	1,91	2,54	3,83	9,08	7,17
a9	365,5	35,21	24,1	1,83	2,46	3,68	8,74	6,91
a10	368	35,23	26,7	1,73	2,36	3,52	8,34	6,61

A Tabela A5 reúne dados de análises de amostras de leite feitas pelo sistema desenvolvido. Estes dados foram comparados às análises realizadas pelo Laboratório Centralizado de Análise de Leite, Curitiba, PR.

Tabela A5 - Resultados das análises feitas pelo protótipo.

	Quantidade de água (%)	Quantidade de gordura (%)	Quantidade de proteína (%)	Extrato Seco Desengordurado (%)
a1	20,37	2,78	2,54	7,2
a1	20,9	2,81	2,53	7,15
a1	21,13	2,9	2,53	7,13
a1	18,71	2,87	2,6	7,36
a2	24,46	2,79	2,24	6,26
a2	25,22	2,71	2,4	6,75
a2	29,18	2,29	2,28	6,38
a2	19,35	2,4	2,58	7,3
a3	23,3	2,56	2,46	6,9
a3	26,05	2,6	2,38	6,67
a3	26,3	2,79	2,46	6,93
a3	23,79	2,76	2,45	6,88
a4	24,38	2,59	2,43	6,83
a4	29,18	2,65	2,28	6,38
a4	25,21	2,68	2,4	6,75
a4	25,33	2,57	2,4	6,74
a5	26,18	2,53	2,37	6,66
a5	36,96	2,56	2,05	5,65
a5	27,38	2,53	2,34	6,55
a5	25,7	2,57	2,39	6,7
a6	34,32	2,49	2,13	5,9
a6	30,23	2,42	2,25	6,28
a6	28,9	2,43	2,29	6,4
a6	28,52	2,34	2,3	6,44
a7	33,29	2,29	2,16	5,99
a7	34,73	2,3	2,11	5,86
a7	35,68	2,37	2,09	5,77
a7	33,73	2,27	2,15	5,95
a8	34,77	2,09	2,11	5,86
a8	35,71	2,23	2,09	5,77
a8	37,15	2,12	2,04	5,63
a8	34,16	2,16	2,13	5,91

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMOWSKI, JÚLIO C.; BUIOCHI, FLÁVIO; SIMON, CLÁUDIO; SILVA, EMÍLIO C.N.; SIGELMANN, RUBENS A. Ultrasonic Measurement of Density of Liquids. **Journal of the Acoustical Society of America** **97** (1): 354-361, 1995.

ALAIS, Charles. **Ciencia de la Leche – Principios de Tecnica Lechera**. 5ª ed., 1984, Ed. Compañía Editorial Continental, México.

ANALOG DEVICES. **Tmp137 – Low Voltage Temperature Sensor**, 2006.

BULTEH. **Ekomilk Analizer - Manual de Operação**, 2000.

BRONZINO, JOSEPH D. **Biomedical Engineering and Instrumentation: Basic Concepts and Applications**. BWS-Kent, 1986.

CHRISTENSEN, DOUGLAS A. **Ultrasonic Bioinstrumentation**. 1ª ed, 1988, Wiley.

DION, JEAN L.; BARWICZ, ANDRZEJ. Practical Ultrasonic Spectrometric Measurement of Solution Concentration by a Tracking Technique. **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control** **17** (2): 190-195, 1990.

FERROPERM PIEZOCERAMICS. **Pz27 (Navy II): A Soft PZT With Low Ageing Rates and High Sensitivity**, 2004.

FERROPERM PIEZOCERAMICS. **Application Guide**. Disponível em <http://www.ferroperm-piezo.com/>. Acessado em 28/08/2007.

FISH, PETER. **Physics and Instrumentation of Diagnostic Medical Ultrasound**. 1990, John Wiley & Sons, New York, EUA.

FRADEN, JACOB. **Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs and Applications**. 2ª Edição, 1996, Springer-Verlag, New York.

FITZGERALD, JAMES W.; WINDER, WILLIAM C.; ROY, RINGO G. Method for Determining the Constituents of Milk and Milk Products. United States Patent No. 3.040.562, 1962.

GOFF, DOUGLAS. **Dairy Chemistry and Physics**. Department of Food Science, University of Guelph, 1995. Disponível em <http://www.foodsci.uoguelph.ca/dairyedu/chem.htm>. Acessado em 17/08/2007.

HIGUTI, RICARDO T.; BACANELI, FERNANDO; FURUKAWA, CELSO M.; ADAMOWSKI, JÚLIO C. Ultrasonic Characterization of Emulsions: Milk and Water in Oil. **1999 IEEE Ultrasonics Symposium**: 779-782.

KRAUTKRÄMER, JOSEF; KRAUTKRÄMER, HERBERT. **Ultrasonic Testing of Materials**. 1a Edição, 1969, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, Alemanha.

LAKTRON. – **Crioscópio LK-7000 – Manual de Operação**, 2003.

LEMON, STANLEY G.; EISEMAN, WILLIAM F.; JEANNE, CHARLES E. Sing Around Velocimeter. United States Patent No. 3.392.574, 1968.

LISHMAN, A.W. **The Cow's Udder and Milk Secretion**. 1995. Disponível em http://agriculture.kzntl.gov.za/portal/publications/production_guidelines/dairying_in_natal/dairy6_1.htm. Acessado em 21/07/2007.

MAIA, JOAQUIM M. **Sistema Ultra-Sônico ara Auxílio ao Diagnóstico da Osteoporose**. Campinas, 2001, 158p, [Tese – Doutorado – Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP].

McCLEMENTS, DAVID J. Advances in the Application of Ultrasound in Food Analysis and Processing. **Trends in Food Science & Technology** 6 (9): 293-299, 1995.

MEISSNER, A. – Über Piezoelectrische Krystalle bei Hochfrequenz. **Z. Tech. Phys.** 8(74), 1927.

MILES, C.A.; SHORE, D.; LANGLEY, K.R. Attenuation of Ultrasound in Milks and Creams. **Ultrasonics** 28 (6): 394-400, 1990.

NASCIMENTO, VALÉRIA M. **Desenvolvimento de um Protocolo Para Construção e Caracterização de Transdutores de Ultra-som**. Campinas, 2003, 159p, [Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP].

NGUYEN, NAM T.; LETHIECQ, MARC; KARLSSON, B.; PATAT, F. Highly Attenuative Rubber Modified Epoxi for Ultrasonic Transducer Backing Applications. **Ultrasonics** **34** (6): 669-675, 1996.

ONDA CORPORATION. **Acoustic Properties of Plastics**. 2003. Disponível em <http://www.ondacorp.com/tables/Plastics.pdf>. Acessado em 17/08/2007.

PRIEV, ABA; PONOMAREV, VIKTOR; SARVAZYAN, ARMEN. Method and Apparatus for Determining the Composition of Fluids. United States Patent No. 6.920.399, 2005.

POVEY, MALCOLM J.W. **Ultrasonic Techniques for Fluids Characterization**. 1ª Edição, 1997, Academic Press, Reino Unido.

POWERTIP. **PE12864LRF-004-H COG Module Specification**. Literature Number: PT-A-005-2, 2002.

QUINN, T. **Dairy Farm Management**. 1ª Edição, 1980, Van Nostrand Reinhold, New York.

RIISPOA. **Regulamento da Inspeção Industrial e Sanitária de Produtos de Origem Animal** – Título VIII: Inspeção Industrial e Sanitária de Leite e Derivados. Aprovado pelo Decreto Nº 30.691 de 29 de março de 1952.

SBRISSIA, GUSTAVO F. **Sistema Agroindustrial do Leite: Custos de Transferência e Preços Locais**. Piracicaba, 2005, 58p, [Dissertação de Mestrado – Universidade de São Paulo - USP].

SILVA, PAULO H.F.; PEREIRA, DANIELLE B.C.; OLIVEIRA, LUCIANA L.; COSTA Jr, LUIZ C.G. **Físico-Química do Leite e Derivados – Métodos Analíticos**. Juiz de Fora: Oficina de Impressão Gráfica e Editora, 1997.

SILVEIRA, T.M.L.; FONSECA, L.M.; CANÇADO, S.V.; FERRAZ, V. Comparação Entre os Métodos de Referência e a Análise Eletrônica na Determinação da Composição do Leite Bovino. **Arquivos Brasileiros de Medicina Veterinária e Zootecnia** **56** (6): 782-787, 2004.

TEXAS INSTRUMENTS. **ADS5410: 12-Bit, 80MSPS Analog-to-Digital Converter**. Literature Number: SLAS346, 2002a.

TEXAS INSTRUMENTS. **SN74V245: 4096x18, DSP-SYNC First-In, First-Out Memory**. Literature Number: SCAS636E, 2002b.

TEXAS INSTRUMENTS. **MSP430x1xx Family User's Guide**. Literature Number: SLAU049E, 2005a.

TEXAS INSTRUMENTS. **MSP430x15x, MSP430x16x, MSP430x161x: Mixed Signal Microcontroller**. Literature Number: SLAS368D, 2005b.

TRONCO, VÂNIA M. **Manual Para Inspeção da Qualidade do Leite**. 2ª ed., 2003, Ed. da UFSM, Brasil.

WELLS, PETER N.T. Ultrasonic Imaging of the Human Body. **Reports on Progress in Physics** **62 (5)**: 671-722, 1999.

WINDER, WILLIAM C.; & WAGNER, RICHARD J. Method and Apparatus for Controlling Composition of Milk. United States Patent No. 4.145.450, 1979.

ZEMANEK, JOE. Beam Behavior Within the Nearfield of a Vibrating Piston. **Journal of the Acoustic Society of America** **49 (1)**: 181-191, 1971.

RESUMO

Este trabalho apresenta o projeto, desenvolvimento e testes de um sistema de caracterização de leite bovino por ultra-som. Analisadores comerciais de leite bovino são utilizados em cooperativas e laticínios a fim de avaliar a qualidade do leite entregue pelos produtores. Entre as características avaliadas estão a quantidade de gorduras, extrato seco desengordurado e água adicionada ao leite. Estes índices são utilizados para estimar o rendimento da produção de laticínios e adulteração do leite. O sistema desenvolvido bombeia a amostra a ser analisada para o interior de uma célula de testes, que é aquecida a fim de fazer medições sob temperatura conhecida. Em seguida, o sistema adquire o valor da amplitude e tempo de propagação do pulso de ultra-som na amostra e relaciona estes parâmetros acústicos a valores de gorduras, extrato seco desengordurado, proteínas e água adicionada nas amostras de leite. O sistema tem boa reprodutibilidade, apresentando baixo Coeficiente de Variação (inferior a 8,8%) para análises dos componentes sólidos do leite – gorduras, proteínas e extrato seco desengordurado. Os testes de calibração apresentaram coeficientes de determinação entre os parâmetros acústicos (atenuação e velocidade de propagação) e os parâmetros a serem avaliados (teor de gordura, extrato seco desengordurado, proteínas e água adicionada) superiores a 97 % ($R^2 > 0,97$), com erros padrão de estimativa inferiores a 1,25%, indicando baixa dispersão dos dados experimentais em relação às curvas de regressão. Para avaliar o protótipo desenvolvido, foram realizados testes comparativos com equipamentos de referência. Foram utilizadas amostras de leite proveniente de um único fornecedor. Apesar do pequeno número de amostras/fornecedores avaliados, os erros percentuais absolutos máximos obtidos para as análises de componentes sólidos foram de 12,6% para gordura, 12,37% para proteínas e 13,76% para extrato seco desengordurado. Já para a quantidade de água adicionada, os erros foram superiores a 40%, no entanto estes erros deverão ser reduzidos utilizando-se um conjunto maior de amostras/fornecedores durante o processo de calibração e avaliação final do protótipo desenvolvido. Os resultados preliminares obtidos permitem concluir que o sistema de ultra-som desenvolvido é adequado para a determinação dos principais componentes do leite bovino.

PALAVRAS-CHAVE

Ultra-som, leite bovino, caracterização, teor de gordura, água adicionada, instrumentação eletrônica.

ÁREA/SUB-ÁREA DE CONHECIMENTO

3.13.00.00 – 6 Engenharia Biomédica

3.04.02.04 – 2 Instrumentação Eletrônica

2007

Nº: 459