

Antonio Braulio Neto

SISTEMA DE POSICIONAMENTO ACÚSTICO

SÃO PAULO

2011

Antonio Braulio Neto

SISTEMA DE POSICIONAMENTO ACÚSTICO

Trabalho de conclusão de curso de Engenharia Mecânica com habilitação em Automação e Sistemas para obtenção do título de Engenheiro da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Professor orientador: Julio Cesar Adamowski

SÃO PAULO

2011

FICHA CATALOGRÁFICA

Braulio Neto, Antonio

Sistema de posicionamento acústico / A. Bráulio Neto. -- São Paulo, 2011.

76 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos.

1. Sensoriamento remoto 2. Sensor (Aplicações) 3. Engenharia (Automação) I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos II. t.

AGRADECIMENTOS

A conclusão deste trabalho representa uma grande conquista que só foi possível com ajuda daqueles que me fizeram acreditar que esse dia chegaria.

Agradeço a Flávio Ribeiro e ao casal de engenheiros Wesley Becari e Andréia Souza pela ajuda técnica e diversos incentivos.

Agradeço especialmente a meus pais, Francisco e Dirce, exemplos de perseverança e determinação, ao amigo Camillo de Vasconcellos Machado, pelo incansável incentivo à conclusão deste trabalho e ao professor orientador Julio Cesar Adamowski.

RESUMO

O objetivo deste trabalho é o projeto e a implementação de um sistema de localização para objetos móveis operando dentro de um espaço pré-estabelecido e utilizando transdutores de ultrassom para emissão e recepção das ondas acústica com propagação pelo ar numa frequência de 40kHz. Este sistema pode ser empregado na exploração ou inspeção de ambientes de difícil acesso para operadores, em ambientes insalubres, para monitoramento remoto de processos automatizados e, recentemente, no monitoramento de pessoas. O sistema será composto por um conjunto de transdutores fixados no objeto a ser localizado e quatro transdutores distribuídos no ambiente. O conjunto de transdutores fixos no objeto opera como emissores e representa um único ponto no espaço; aqueles distribuídos no ambiente operam como receptores e delimitam o espaço de trabalho. Esses últimos, ao receberem as ondas geradas pelo emissor, enviam um sinal para o registro do respectivo tempo de voo da onda ultrassônica. O tempo de voo é correlacionado com a distância por meio da velocidade de propagação do som no ar. A localização no espaço é feita por meio de uma triangularização 3-D, a partir das quatro distâncias medidas entre o objeto e os transdutores distribuídos no espaço. A determinação da posição utiliza o método de minimização da somatória do erro quadrático das distâncias. O desenvolvimento do sistema de localização consiste: no estudo da propagação de ondas ultrassônicas e de transdutores ultrassônicos piezoelétricos; projeto e implementação do circuito eletrônico para transmissão e recepção de ondas acústicas utilizando um microcontrolador para aquisição e transmissão dos dados via comunicação serial; desenvolvimento do software de controle e processamento de dados com a interface do usuário; ensaios para calibragem e verificação dos dados experimentais.

Palavras-chave: Ultrassom, posicionamento acústico, robótica

ABSTRACT

The objective of this work is the design and implementation of a ultrasound positioning system for mobile objects with ultrasound transducers for transmission and reception of acoustic waves propagating through the air with a frequency of 40kHz. This system can be used in the operation or inspection of unhealthy environments for remote monitoring of automated processes, and recently began to be used in the indoor people monitoring. The system will consist of a set of transducers fixed on the object to be located and four transducers distributed in the environment. The set of transducers fixed on the object work as emitters and the transducers in the environment work as receivers. The time of arrival of ultrasonic wave, between emitter and receivers, is correlated with distance through the propagation speed of sound in air. The location in space is done through a 3-D triangulation, from the four distances between the object and the transducers distributed in space. The position determination using the method of minimizing the sum of the squared error distances. The development of the ultrasound positioning system consists of: the study of ultrasonic wave propagation and ultrasonic piezoelectric transducers, design and implementation of the electronic circuit for transmission and reception of acoustic waves using a microcontroller for acquisition and transmission of data via serial communication; software control and data processing with the user interface, calibration and experimental data analysis.

Keywords: Ultrasound, positioning, robotic

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Reflexão e transmissão de uma onda acústica.....	7
Figura 2.2: Atenuação característica da pressão acústica em função da distância (Murata,S15E).....	9
Figura 2.3: Representação do efeito piezoelétrico.....	10
Figura 2.4: Propagação de ondas acústicas geradas a partir de um transdutor circular,mostrando a interação entre as ondas de borda e a onda direta.....	11
Figura 2.5: (a) Seção longitudinal através do feixe ultrassônico gerado por um transdutor circular de raio a . (b) Variação da intensidade de pressão ao longo do eixo axial do transdutor.....	12
Figura 2.6: Modelo para equacionamento esférico 3-D.....	13
Figura 3.1: Representação esquemática do protótipo – arranjo preliminar.....	16
Figura 3.2: Transdutor MA40S5 (Murata).....	17
Figura 3.3: Construção do Tipo Open Structure do sensor ultrassônico (Murata, S15E).....	18
Figura 3.4: Diretividade do transdutor ultrassônico (Murata P19E9)	18
Figura 3.5: Configuração dos pinos do ATmega8535 (Atmel).....	19
Figura 3.6: Diagrama de blocos do ATmega8535 (Atmel).....	19
Figura 3.7: Aplicação típica do sensor de temperatura LM35 (National).....	20
Figura 3.8: Representação dos lóbulos cônicos dos receptores.....	21
Figura 3.9: Intersecção dos lóbulos receptores. A figura da esquerda representa o lóbulo de um receptor dentro do espaço de trabalho; a figura central representa o volume formado pela intersecção dos lóbulos dos quatro receptores; a figura da direita representa o volume útil dentro do espaço de trabalho.....	22
Figura 3.10: Esquema do principio de funcionamento do <i>hardware</i>	23
Figura 3.11: Carta de tempo dos sinais.....	24
Figura 3.12: Diagrama de blocos principal do sistema.....	25
Figura 3.13: Diagrama de blocos – <i>loop</i> infinito do sistema.....	25
Figura 3.14: Diagrama de blocos – medição do tempo de voo.....	26
Figura 3.15: Diagrama de blocos – interface com o usuário.....	26

Figura 4.1: Impedância elétrica para o transdutor MA40S5. Frequência de ressonância (F_r) e anti-ressonância (F_a).....	28
Figura 4.2: Circuito equivalente para a cerâmica piezoelétrica do transdutor.....	28
Figura 4.3: Sobreposição das curvas do módulo de impedância do transdutor e do circuito equivalente.....	29
Figura 4.4 – Projeto do circuito eletrônico.....	30
Figura 4.5 – Protótipo do circuito eletrônico.....	30
Figura 4.6 – Tela de interface com o usuário.....	31
Figura 4.7 – Primeira alternativa proposta.....	33
Figura 4.8 – Segunda alternativa proposta.....	33
Figura 4.9 – Conjunto de emissores fixados no objeto.....	34
Figura 4.10: Terceira alternativa proposta – arranjo final.....	35
Figura 4.11: Tela de interface – resultado dos testes.....	35
Figura 4.12: Evolução do erro quadrático com o número de iterações.....	37
Figura 4.13: Evolução do percentual do erro quadrático com o número de iterações.....	38
Figura 4.14: Evolução da distância à solução exata com o número de iterações.....	38
Figura 4.15: Evolução do erro percentual da distância com o número de iterações.....	38
Figura 4.16: Representação da intersecção de esferas e do método de localização utilizado.....	39
Figura 4.17: Visualização espacial da convergência do método de Newton-Raphson.....	40
Figura D-1: Transdutores MA40S5 (Murata).....	57
Figura D-2: Testes de medição de distâncias – circuito e interface com usuário.....	57
Figura D-3: Testes de medição de distâncias – transdutores.....	58
Figura D-4: Testes de medição de distâncias – transdutor receptor.....	58
Figura D-5: Testes de medição de distâncias – transdutor emissor.....	59
Figura D-6: Primeira alternativa proposta.....	59
Figura D-7: Testes com o novo arranjo de emissores.....	60

Figura D-8: Terceira alternativa proposta – solução final.....	60
Figura D-9: Terceira alternativa proposta – detalhe da fixação dos transdutores.....	61
Figura D-10: Terceira alternativa proposta – emissor e circuito de controle.....	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Características do sensor ultrassônico MA40S5 (Murata, S15E).....	17
Tabela 3.2: Volume útil – intersecção dos cones de recepção.....	22
Tabela 4.1: Arquivo de armazenamento de dados.....	36
Tabela 4.2: Tabela resumo dos resultados obtidos pelo sistema de localização.....	36
Tabela 4.3: Dados de entrada para o método de Newton-Raphson.....	37
Tabela E-1: Resultado dos testes de localização.....	62

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2	OBJETIVO.....	1
1.3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	1
1.4	METODOLOGIA	3
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	3
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	4
2.1	TEORIA ACÚSTICA.....	4
2.1.1	<i>Impedância acústica</i>	<i>6</i>
2.1.2	<i>Transmissão de onda</i>	<i>6</i>
2.1.3	<i>Características do meio</i>	<i>8</i>
2.1.4	<i>Efeito piezoelétrico</i>	<i>10</i>
2.1.5	<i>Transdutores de ultrassom</i>	<i>10</i>
2.2	MODELO MATEMÁTICO PARA LOCALIZAÇÃO	13
3	MATERIAIS E MÉTODOS	16
3.1	DESCRIÇÃO DO SISTEMA	16
3.2	COMPONENTES ELETRÔNICOS PRINCIPAIS	17
3.2.1	<i>Transdutores MA40S5</i>	<i>17</i>
3.2.2	<i>Microcontrolador ATmega8535</i>	<i>18</i>
3.2.3	<i>Sensor de temperatura LM35</i>	<i>20</i>
3.2.4	<i>Fonte de Alimentação.....</i>	<i>21</i>
3.3	ESPAÇO ÚTIL DE TRABALHO	21
3.4	ESPECIFICAÇÃO DE PROJETO	22
3.5	HARDWARE	23
3.6	SOFTWARE	24
3.6.1	<i>Software embarcado</i>	<i>24</i>
3.6.2	<i>Software de interface com o usuário.....</i>	<i>25</i>
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	27
4.1	ENSAIOS PRELIMINARES	27
4.2	HARDWARE	29
4.3	SOFTWARE	31
4.3.1	<i>Software embarcado</i>	<i>31</i>
4.3.2	<i>Software de interface com o usuário.....</i>	<i>31</i>
4.4	ARRANJO FÍSICO DO SISTEMA.....	32
4.5	TESTES	35
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	41
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	42
	APÊNDICE A - CÓDIGO-FONTE DO MICROCONTROLADOR	43

MAIN.C.....	43
GENERATOR.C	46
MULTIPLEX.C.....	47
ADC.C.....	47
APÊNDICE B - CÓDIGO-FONTE DO MÉTODO DE LOCALIZAÇÃO	49
<i>SCRIPT</i> NO MATLAB®	49
APÊNDICE C - CÓDIGO-FONTE DO SOFTWARE DE INTERFACE COM O USUÁRIO	51
APÊNDICE D - FOTOS DO PROTÓTIPO E DOS TESTES	57
APÊNDICE E - RESULTADO – TABELA DE MEDIÇÕES	62

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

A tecnologia de sistemas de localização tornou-se parte de nosso cotidiano: veículos de navegação, inspeções terrestres, localização de carros por sistemas de GPS, mais recentemente, serviços de localização para telefonia móvel, sensor de estacionamento de carros e rastreamento *indoor* de pessoas, além de outros. Isso é possível devido ao grande avanço nas pesquisas na área de sensores, ou dispositivos que realizam a interação de sistemas com o meio.

Assim, técnicas empregando ondas de ultrassom podem ser utilizadas na determinação da posição e orientação de um objeto. Tais técnicas possuem a vantagem (Santos, 2005), quando associadas aos sensores de ultrassom, de serem de baixo custo de produção, excelente estabilidade em longo prazo, baixo consumo de energia, alta repetibilidade, alta linearidade e resposta rápida, em conjunto com resistência aos efeitos da umidade, intempéries ambientais e aos desgastes ocasionados pelo envelhecimento. Porém, apresentam limitações de alcance devida a alta atenuação das ondas ultrassônicas, principalmente quando o seu meio de propagação é o ar.

1.2 Objetivo

O objetivo principal deste trabalho é o projeto e a construção de um sistema de localização *indoor* para robôs móveis baseado na emissão e recepção de ondas de ultrassom com a sua propagação pelo ar.

O sistema proposto utiliza um módulo principal, constituído por *hardware* e *software*, que engloba a eletrônica para geração, recepção e tratamento dos sinais com o envio de dados para o software de interface com o usuário, responsável pela determinação e apresentação da posição para o usuário.

1.3 Revisão Bibliográfica

A concepção deste trabalho foi realizada a partir de pesquisas sobre o emprego de técnicas de ultrassom em diversas áreas. Os meios utilizados para essas pesquisas foram

dissertações, livros, internet e catálogo de fabricantes de sensores e sistemas embarcados de ultrassom.

Um estudo teórico sobre fundamentação acústica é abordado em (Kinsler et al., 1982), utilizado neste trabalho para o entendimento dos processos de geração, transmissão e recepção.

São inúmeras as fontes disponíveis, nos meios acima citados, que apresentam trabalhos que se utilizam de ultrassom para os mais diversos fins, uma completa compilação é apresentada em (Santos, 2005). Já (Estevez, 1989) apresenta os diversos sensores que utilizam as mais variadas técnicas na geração de ultrassom para a determinação de distâncias com aplicação e interação no campo da robótica. A medição de distâncias visando à determinação da localização ou o posicionamento de objetos está dentro desta variedade de empregos para as ondas ultrassônicas.

Alguns dos sites visitados, que se referem a temas comuns ao tema objeto de estudo deste trabalho, podem ser vistos na lista abaixo:

- 2010 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN). Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/mostRecentIssue.jsp?punumber=5637226>>. Acesso em: 10 jun. 2011;
- Ultrasonic Positioning System. Disponível em: <http://fileadmin.cs.lth.se/cs/Education/EDA385/HT08/final_projects/ProjectReportUltrasonic.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2011;
- Low Cost Ultrasonic Positioning System for Mobile Robots. Disponível em: <http://www.ias.uwe.ac.uk/~a-winfie/Bjerknes_etal_TAROS07.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2011;

Após o estudo e comparação dos diversos métodos para a medição de distância, seja por transmissão direta, ou por pulso-eco (Milne, 1983; Matuda, 1993; Santos, 2005) e dos diversos algoritmos de triangularização direta ou iterativa (Milne, 1983; Santos, 2005; Dijk, 2004), o autor optou pelo projeto e implementação de um sistema de posicionamento *indoor* utilizando o arranjo e a arquitetura apresentados no decorrer do trabalho por tratar-se de métodos já utilizados e, portanto, factíveis e que atingem o objetivo deste trabalho.

1.4 Metodologia

O presente projeto estruturou-se com base nos seguintes métodos e procedimentos:

- Estudo sobre ondas acústicas, suas características e áreas de utilização;
- Estudo das características dos transdutores ultrassônicos;
- Equacionamento do problema de localização espacial de um ponto a partir da distância entre pontos pré-determinados, utilizando-se do método de minimização da somatória dos erros quadráticos;
- Desenvolvimento da eletrônica de transmissão e recepção de sinais para determinação do tempo de voo das ondas ultrassônicas;
- Desenvolvimento da eletrônica de transmissão de dados via comunicação serial entre hardware e computador pessoal;
- Desenvolvimento do software para processamento dos dados e interface com o usuário para apresentação dos resultados.
- Testes e ensaios.

1.5 Estrutura do Trabalho

O capítulo 1 apresentou a Introdução do trabalho com a definição dos objetivos e contextualização do tema proposto.

O Capítulo 2 da Monografia apresenta uma revisão teórica sobre emissão, propagação e reflexão de ondas de ultrassom utilizadas para determinar distâncias entre objetos.

O capítulo 3 apresenta os Materiais e Métodos utilizados para o desenvolvimento e construção do protótipo, os quais são os objetivos deste trabalho.

No capítulo 4 apresentam-se os Resultados e Discussões dos testes realizados com o protótipo, tanto para a determinação efetiva do posicionamento do objeto quanto dos resultados das etapas intermediárias do processo.

No Capítulo 5 apresentam-se as Considerações Finais acerca da realização deste trabalho, suas contribuições e possibilidades de estudos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Teoria Acústica

Ondas acústicas são provocadas pela variação da pressão que pode ser propagada através de um fluido compressível. Em um fluido não viscoso, elas são consideradas como ondas longitudinais, isto é, as moléculas se movem para frente e para trás na direção de propagação da onda, produzindo regiões adjacentes de compressão e rarefação (Kinsler, 1982).

A equação de estado adiabática para um fluido é dada por (2.1), ela relaciona força aplicada num elemento do fluido com sua deformação:

$$p = \beta s \quad (2.1)$$

onde p é a pressão acústica, β é o módulo volumétrico adiabático, e s é condensação dada por:

$$s = \frac{(\rho - \rho_o)}{\rho_o} \quad (2.2)$$

onde ρ é a densidade instantânea do fluido e ρ_o é a densidade de equilíbrio. A restrição é que a condensação deve ser pequena $|s| \ll 1$ para validar a relação entre as equações (2.1) e (2.2).

A equação (2.3) relaciona o movimento do fluido com sua compressão.

$$\iiint_V \frac{\partial \rho}{\partial t} dV = - \iint_S \rho \vec{u} \cdot \hat{n} dS \quad (2.3)$$

onde: $\vec{u}$ é a velocidade em um volume V qualquer.

A equação (2.3) mostra que o acréscimo de massa dentro do volume é igual à quantidade de massa que atravessa sua superfície. A integral dupla, aplicando o teorema de Gauss, é convertida numa integral tripla. Assim, obtemos a equação da continuidade (2.4).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (2.4)$$

Combinando o fato da condensação s muito pequena e a relação (2.2), a equação (2.4) pode ser linearizada em:

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (2.5)$$

Pela análise da segunda lei de Newton ($d\vec{f} = m \cdot d\vec{a}$) para um elemento de volume, chega-se a equação de Euler não linearizada:

$$-\nabla P = \rho \left[\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} \right] \quad (2.6)$$

A linearização da equação (2.6) pode ser feita considerando s pequeno e $|(\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u}| \ll |\partial \vec{u} / \partial t|$. Aplicando essas aproximações na equação (2.6), chega-se a equação de Euler linearizada:

$$\rho_o \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = -\nabla p \quad (2.7)$$

Aplicando o operador divergente nos dois lados da equação, derivando o resultado em relação ao tempo e substituindo $s = p/\beta$ chega-se à equação característica da onda:

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (2.8)$$

onde c é a velocidade de propagação no fluido dada por:

$$c = \sqrt{\beta / \rho_o} \quad (2.9)$$

Combinando β , dado por $\beta = \rho_o (\partial p / \partial \rho)$, ρ_o , à equação (2.9), tem-se a expressão termodinâmica para a velocidade do som:

$$c = \sqrt{\left(\frac{\partial p}{\partial \rho_o} \right)_{adiabático}} \quad (2.10)$$

Considerando que a onda se propaga através de um gás perfeito num processo adiabático (Matuda, 1993), a equação (2.10) conduz a:

$$c = \sqrt{\gamma \cdot p_o / \rho_o} \quad (2.11)$$

onde γ é a taxa de aquecimento específico do meio

Os valores padrões para o ar a temperatura $T = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ são: $\gamma = 1,402$, $p_0 = 1,0 \times 10^5\text{ Pa}$ e $\rho_0 = 1,275\text{ kg/m}^3$ (Matuda, 1993) e, portanto, de (2.11) tem-se a velocidade teórica do som no ar a uma temperatura de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ é $c_0 = 331,6\text{ m/s}$.

Por fim, a velocidade propagação pode ser avaliada exclusivamente como função da temperatura $T\text{ (}^{\circ}\text{C)}$:

$$c = c_0 \cdot \sqrt{1 + T / 273} \quad (2.12)$$

Pela linearização da equação (2.12) pelo método dos mínimos quadrados (Matuda, 1993), com temperaturas entre 0 e 40°C , chega-se na equação (2.13) com erro máximo de $0,041\%$.

$$c = 331,736 + 0,586437 \cdot T \quad (2.13)$$

2.1.1 Impedância acústica

A impedância acústica de um fluido é definida (Kinsler, 1982) como a razão entre pressão num meio e a velocidade associada a uma partícula.

$$Z = \frac{p}{u} \quad (2.14)$$

onde p é a pressão e u a velocidade das partículas.

Para melhor compreensão de sua importância, uma analogia pode ser feita entre a impedância e o índice de refração n para meios onde ondas luminosas se propagam.

Através da equação de ondas planas (2.8), esta razão é obtida como produto da densidade pela velocidade de propagação no meio.

$$Z = \rho_o c \quad (2.15)$$

2.1.2 Transmissão de onda

Quando uma onda acústica que se propaga em um meio encontra uma interface entre dois meios, uma parcela de sua energia é transmitida e outra é refletida para o meio de origem

(Kinsler, 1982). Para efeito de simplificações dos cálculos, admite-se que a onda tenha incidência normal à interface, isto é, que o ângulo de incidência, reflexão e transmissão sejam igualmente nulos. A onda incidente será representada por p_i , a onda transmitida por p_t e a refletida por p_r de acordo com a Figura 2.1.

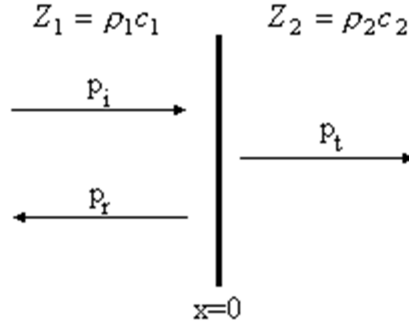


Figura 2.1: Reflexão e transmissão de onda acústica.

A Figura 2.1 apresenta a onda plana p_i que se propaga em um meio de impedância acústica característica Z_1 atingindo a interface de separação com outro meio que possui impedância acústica característica Z_2 .

Conhecidas as impedâncias Z_1 e Z_2 , as pressões da onda incidente, da onda transmitida e da onda refletida, são relacionadas através dos coeficientes de transmissão e reflexão. O coeficiente de transmissão T é definido como:

$$T = \frac{p_t}{p_i} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (2.16)$$

e o coeficiente de reflexão R por:

$$R = \frac{p_r}{p_i} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (2.17)$$

A análise das equações (2.16) e (2.17) resulta que não há reflexão entre meios com valores de impedância iguais.

2.1.3 Características do meio

Ultrassom pode ser definido como onda acústica imperceptível ao ouvido humano, ou seja, com frequência superior a 20 kHz. Para o estudo é importante conhecer as propriedades que caracterizam o meio, no caso o ar, para que possa ser relacionada a velocidade de propagação da onda com a temperatura ambiente. As principais características consideradas são: velocidade de propagação da onda ultrassônica, densidade, impedância acústica e atenuação.

De acordo com (Santos, 2005), a variação de pressão atmosférica na cidade de São Paulo é insignificante para ser levada em consideração no cálculo da velocidade de propagação da onda, sendo esta como função unicamente da temperatura ambiente.

Uma boa aproximação da velocidade pode ser obtida através da linearização da equação (2.12) resultando na equação (2.13), por meio do método dos mínimos quadrados. Esse resultado será utilizado para o cálculo da velocidade de propagação.

Conhecida a velocidade de propagação das ondas, a distância L entre o transdutor móvel e o transdutor fixo pode ser encontrada indiretamente por:

$$L = c \cdot \Delta t \quad (2.18)$$

onde Δt é o tempo de voo da onda entre os transdutores, isto é, o intervalo de tempo necessário para onda emitida ser respondida e recebida por um transdutor.

A atenuação, que consiste no decaimento da amplitude de uma onda acústica que se propaga através de um material, determina o raio de atuação dos transdutores. No ar essa atenuação é proporcional ao quadrado da frequência utilizada. Alguns fatores que contribuem para isso são: divergência do feixe em relação ao eixo central (o que provoca uma diminuição da energia por unidade de área); espalhamento devido a não homogeneidade do meio (uma parcela da energia se desvia da direção de propagação inicial) e absorção pelo meio, onde parte da energia é convertida em calor, principalmente devido às forças de atrito que agem em oposição ao movimento das partículas.

O coeficiente de atenuação é dado por:

$$\alpha = a \cdot f^b \quad (2.19)$$

onde α é o coeficiente de atenuação (dB/cm), f é a frequência (MHz); a é o coeficiente de atenuação para 1MHz e b é o parâmetro correspondente à dependência de atenuação com a frequência.

O gráfico da figura 2.2 apresenta a relação entre a atenuação (dB) e função da distância (m) para algumas frequências acústicas. Pode ser visto que há uma atenuação referente a queda de 20 dB para a distância de 1 m operando com frequências de 40 kHz.

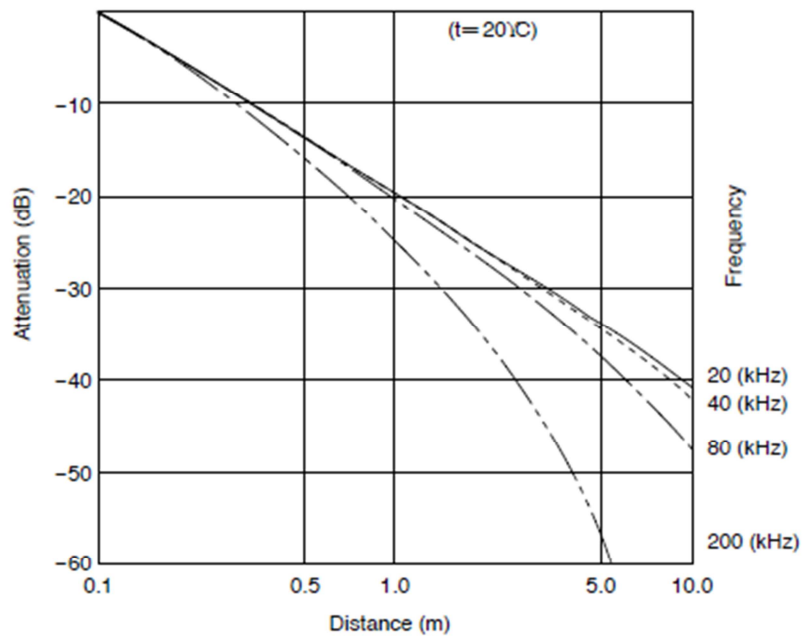


Figura 2.2 – Atenuação característica da pressão acústica em função da distância (Murata, S15E).

A área de alcance restringe-se principalmente devido à atenuação da onda pelo meio de propagação, como é o caso do ar, onde sofrem grandes perdas de intensidade.

Para o cálculo da impedância acústica, utiliza-se a equação (2.15), já a densidade pode ser estimada pela lei dos gases ideais, neste caso considera-se o ar como um gás ideal:

$$p = \rho \cdot R \cdot T \quad (2.20)$$

onde p é a pressão (Pa), R é a constante do gás e T é a temperatura absoluta (K).

2.1.4 Efeito piezoelétrico

De forma geral o efeito piezoelétrico, pode ser definido como a conversão de energia mecânica em energia elétrica (direto) ou a conversão de energia elétrica em energia mecânica (inverso). Uma representação esquemática é apresentada na Figura 2.3.

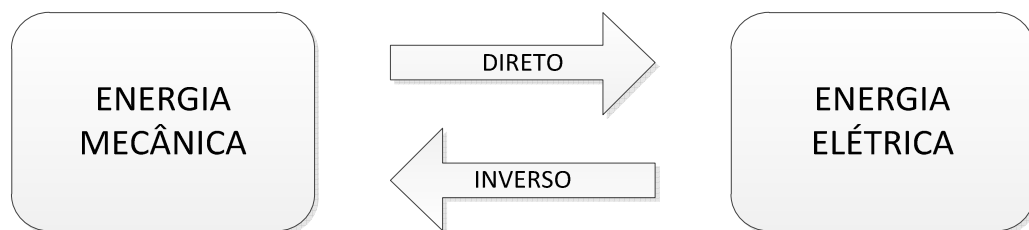


Figura 2.3: Representação do efeito piezoelétrico.

A deformação produzida por um campo elétrico aplicado a um material piezoelétrico gera tensões internas que são linearmente proporcionais a esse campo elétrico.

De acordo com (Estévez, 1989) o fenômeno da piezoeletricidade foi descoberto por Pierre e Jacques Curie por volta de 1880, sendo definido como a propriedade da polarização elétrica que alguns materiais naturais ou sintéticos apresentam quando os seus cristais são submetidos a esforços mecânicos orientados de maneira conveniente em relação aos seus eixos cristalográficos.

A ausência de um centro de simetria no cristal é uma condição necessária para que um material possa apresentar o fenômeno da piezoeletricidade, por isso todos os materiais piezoelétricos são anisotrópicos.

As cerâmicas piezoelétricas são aglomerados aleatórios de cristais ferroelétricos. Materiais cerâmicos podem se tornar piezoelétricos quando submetido a um alto campo elétrico em uma direção escolhida.

2.1.5 Transdutores de ultrassom

Segundo (Estevez, 1989) transdutor é o elemento que converte uma forma de energia em outra, assim, transdutores de ultrassom podem ser definidos como um elemento que

converte uma forma de energia de entrada, por exemplo, elétrica, em vibrações mecânicas que resultarão em ondas de ultrassom. Estes dispositivos terão como característica a frequência da onda gerada. Podem ser feitos por materiais que apresentam o efeito piezoelétrico: cristais, semicondutores, cerâmicas, polímeros e compósitos e polímeros ou através de placa móvel (transdutor eletrostático). A maioria dos transdutores encontrados nos equipamentos comerciais de ultrassom é baseada em cerâmicas piezoelétricas, sendo elementos singulares (geralmente na forma de discos) ou matrizes com os elementos cerâmicos consecutivos diminutos (*array transducers*).

A análise da atuação um transdutor pode ser feita através da visualização do campo de radiação gerado por ele quando excitado com um pulso estreito, isto é, de curta duração.

A Figura 2.4 apresenta que esse campo para um transdutor circular pode ser caracterizado em duas regiões (Kinsler, 1982): a região próxima e a região distante da fonte.

Na primeira temos a superposição entre as ondas de borda, geradas na periferia do transdutor, e as ondas diretas, geradas a partir de toda a face do transdutor, com direções e fases diferentes, gerando interferência construtiva e destrutiva. Nesta região o campo é pouco divergente. Na região de campo distante, a diferença de fase entre as ondas e a direta não são tão evidentes e a interferência é construtiva de maneira a formar uma frente de onda quase plana que atenua à medida que se propaga no meio, distanciando-se da fonte. Nesta região o campo tende a ser divergente.

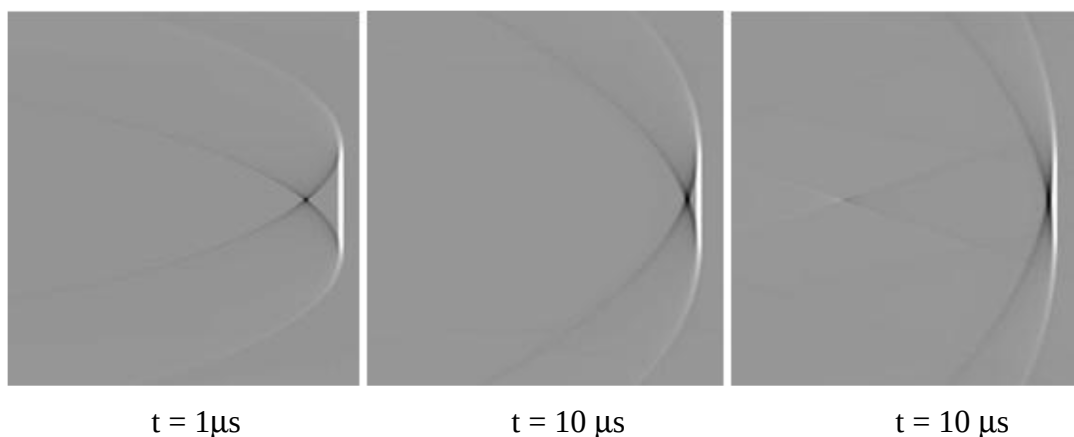


Figura 2.4: Propagação de ondas acústicas geradas a partir de um transdutor circular, mostrando a interação entre as ondas de borda e a onda direta (Kinsler, 1982).

Considerando excitação contínua, para um transdutor plano circular de raio a , a separação do campo próximo e do campo distante ao longo do seu eixo axial, vide Figura 2.5-a, ocorre quando o ângulo de divergência do feixe na região de campo distante é dado aproximadamente por:

$$\theta = \sin^{-1}(0,61 \cdot \lambda/a) \quad (2.21)$$

Como mostra a Figura 2.5-b, essa separação ocorre mais precisamente numa distância $z = 0,75a^2/\lambda$ da fonte, isto é, onde há o último pico de máximo de intensidade da onda.

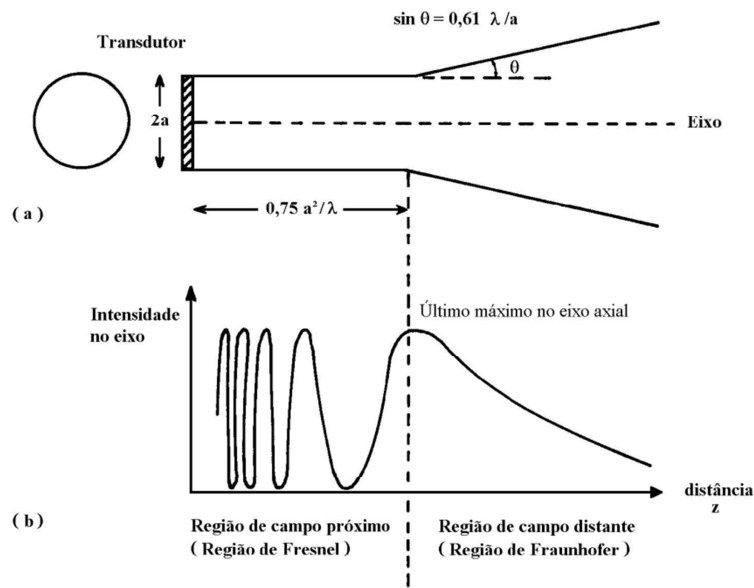


Figura 2.5 - (a) Seção longitudinal através do feixe ultrassônico gerado por um transdutor circular de raio a . (b) Variação da intensidade de pressão ao longo do eixo axial do transdutor.

A porcentagem da energia elétrica que é convertida em energia mecânica pode ser determinada através do fator de acoplamento do modo longitudinal k_t , que é relacionado com as frequências de ressonância Fr e anti-ressonância Fa através da relação:

$$k_t^2 = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{Fr}{Fa} \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{Fa - Fr}{Fr} \right) \quad (2.22)$$

2.2 Modelo Matemático para Localização

A determinação de posição pode ser feita de duas maneiras básicas: posicionamento esférico, com intersecção de esferas e posicionamento hiperbólico, com intersecções de hiperboloides. Essas duas maneiras podem ser subdivididas em quatro categorias gerais (Milne, 1983): método hiperbólico 2-D com altura conhecida; método esférico 2-D com altura conhecida; método hiperbólico 3-D com altura desconhecida; método esférico 3-D com altura desconhecida. Cada um dos métodos acima pode ser subdividido em algoritmos de cálculo direto para a sua solução ou algoritmos iterativos.

(Santos, 2005) avalia que algoritmos de cálculo direto fazem muitas suposições para determinar a posição, normalmente utiliza-se de substituições e o sistema que emprega tal tipo de algoritmo é prejudicado se houver falha em qualquer um dos sensores. A partir de transdutores adicionais, tornando as medições redundantes, é possível utilizar algoritmos iterativos de mínimos quadrados para a localização. Porém, o aumento do número de transdutores implica no aumento do tempo de processamento.

Para o presente trabalho, foi utilizado o método esférico 3-D para realizar a triangularização, com minimização de erros quadráticos pelo método de Newton-Raphson.

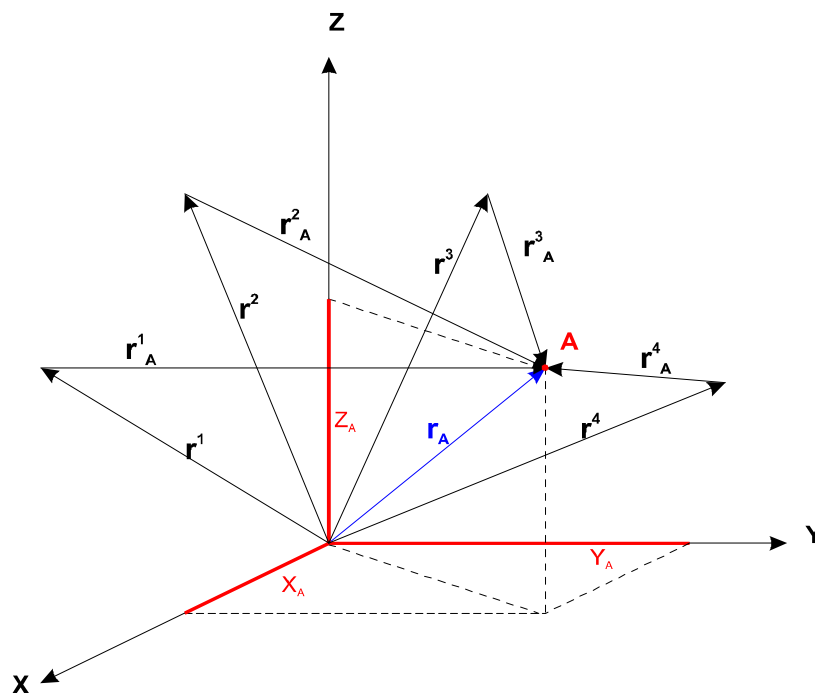


Figura 2.6 – Modelo para equacionamento esférico 3-D.

A Figura 2.6 é a base para o equacionamento desenvolvido, equacionamento esférico 3-D, no qual aplica-se o método de localização proposto. Nesta figura têm-se quatro transdutores fixos, ou sensores distribuídos dentro de um espaço pré-determinado, representados pelos vetores r^1 , r^2 , r^3 e r^4 , operam para a obtenção da localização de um objeto móvel que está representado pelo ponto A.

Adotou-se um sistema de referência (origem e eixos ortonormais orientados pelos versores x , y e z). Cada sensor possui uma posição p_i (x_i, y_i, z_i) pré-estabelecida e uma distância d_i do objeto, dada pela equação (2.18).

O lugar geométrico possível para se encontrar o objeto é dado pela equação da esfera:

$$(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2 = d_i^2 \quad (2.23)$$

onde d_i é a distância conhecida entre cada transdutor e o objeto.

Dada uma configuração inicial, isto é, uma estimativa da localização do objeto, associa-se um erro para cada par (transdutor fixo-transdutor móvel), dado por:

$$E_i = \left[(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2 - d_i^2 \right] \quad (2.24)$$

O erro total, dado pela equação 2.25, é a soma dos erros de todos os pares (emissor-receptor) dados pela equação (2.24).

$$E = \sum_{i=1}^4 \left[(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2 - d_i^2 \right]^2 \quad (2.25)$$

O método proposto para determinar a localização do objeto consiste em minimizar a função E dada pela equação 2.25, sendo definida por:

$$E : R^3 \rightarrow R$$

O ponto de mínimo buscado é um ponto crítico da função $E(x,y,z)$ e, portanto, é o ponto no qual o vetor gradiente da função $E(x,y,z)$ torna-se um vetor nulo. Dessa forma, define-se a função vetorial F na equação 2.26:

$$F(X) = F(x, y, z) = \text{Gradiente} [E(x, y, z)] = \vec{0} \quad (2.26)$$

$$F : R^3 \rightarrow R^3$$

O ponto de mínimo buscado para a função $E(x,y,z)$ é o ponto $X = [x,y,z]$ que satisfaz a equação vetorial (2.26).

Para resolução do sistema não linear acima, aplica-se o método iterativo de Newton-Raphson generalizado para funções de múltiplas variáveis:

$$X^{n+1} = X^n - Jac^{-1}F(X^n) \times F(X^n)$$

onde $Jac^{-1}F(X^n)$ é a matriz jacobiana inversa da função F avaliada no ponto $X^n = [x^n, y^n, z^n]$ e n é o número do passo ou o número da iteração

A posição do objeto a ser definida é aproximada pela resolução iterativa acima, sendo obtida pelo valor de X^n .

O método de Newton-Raphson implementado para atingir os objetivos deste projeto está apresentada no apêndice do código-fonte do método de localização – Apêndice B.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Descrição do Sistema

O princípio básico para determinação da posição de um objeto apresentado na Figura 2.6 traduziu-se no arranjo proposto na Figura 3.1. Os principais componentes estão descritos a seguir:

- O número 1 representa o conjunto de transdutores responsáveis pela recepção das ondas de ultrassom. Estes transdutores estarão localizados nos vértices superiores da “caixa” que delimita o volume de trabalho;
- O número 2 indica o transdutor responsável pela emissão das ondas de ultrassom. Este transdutor representa o objeto móvel a ser localizado;
- O número 3 representa o módulo principal responsável pela emissão e recepção dos sinais. O módulo é constituído pela fonte de alimentação e pelo circuito eletrônico para controle de emissão e recepção dos sinais e transmissão de dados via comunicação serial.

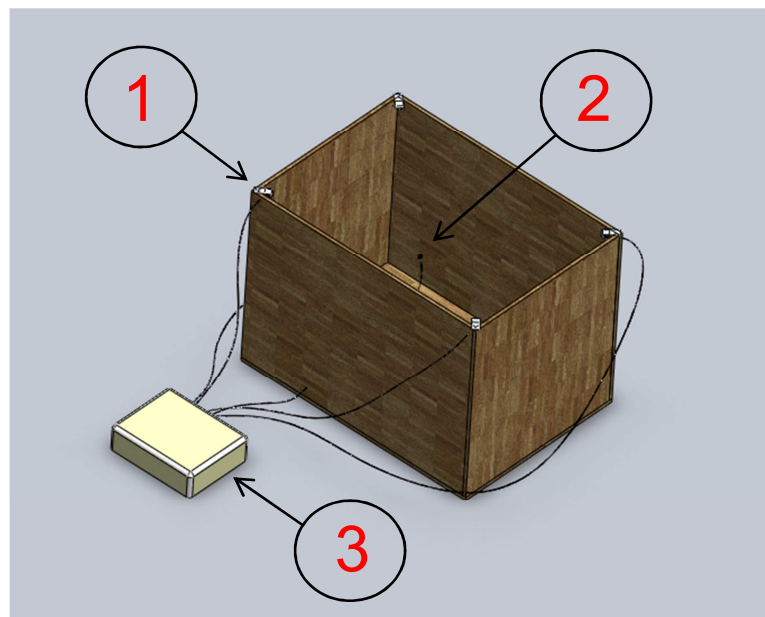


Figura 3.1 – Representação esquemática do protótipo – arranjo preliminar.

3.2 Componentes Eletrônicos Principais

3.2.1 Transdutores MA40S5

Dentre alguns transdutores pesquisados, para o projeto e a implementação do sensor de medição de distâncias, utilizou-se os transdutores de ultrassom constituídos por cerâmicas piezoelétricas com frequência nominal de ressonância de 40 kHz, modelo MA40S5 da fabricante Murata, Figura 3.2.



Figura 3.2: Transdutor MA40S5 (Murata).

As principais características dos transdutores escolhidos são apresentadas na Tabela 3.1, valores fornecidos pelo fabricante.

Part Number	Structure	Using Method	Nominal Freq. (kHz)	Overall Sensitivity (mVp-p)	Sensitivity (dB)	S.P.L. (dB)	Directivity (°)	Cap. (pF)	Operating Temp. Range (°C)	Detectable Range (m)	Max. Input Voltage (Vp-p)
MA40S5	Open struct.	Dual Use	40	20 +20/-10	-	-	60 (typ.)	2550	-40 to 85	0.3 to 2	20 40kHz square waves, 16pulses per 100ms

Tabela3.1 – Características do transdutor ultrassônico MA40S5 (Murata, S15E).

Conforme a tabela acima, este transdutor é construído numa estrutura do tipo *Open Structure* apresentada na Figura 3.3. Esta estrutura principal é formada por um vibrador múltiplo que é a combinação de um amplificador mecânico (*horn*) e um elemento vibrante constituído por uma camada metálica e uma camada de cerâmica piezoelétrica. A forma cônica do ressonador aumenta a eficiência da radiação das ondas ultrassônicas e a concentra as ondas recebidas na parte central do vibrador.

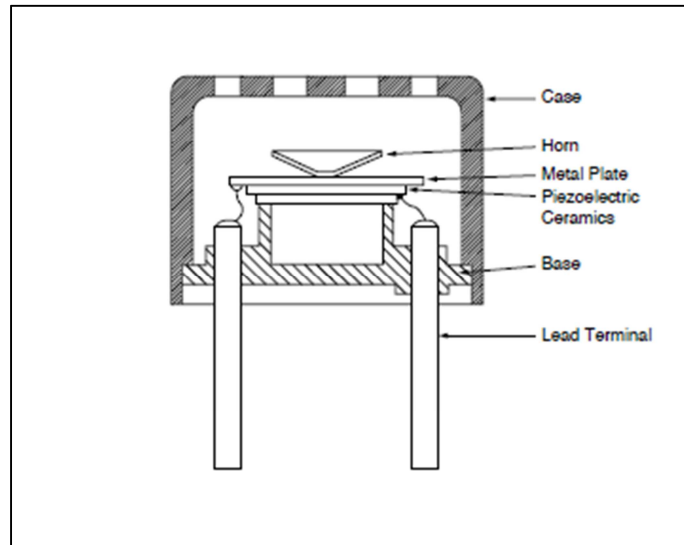


Figura 3.3 – Construção do Tipo *Open Structure* do sensor ultrassônico (Murata, S15E).

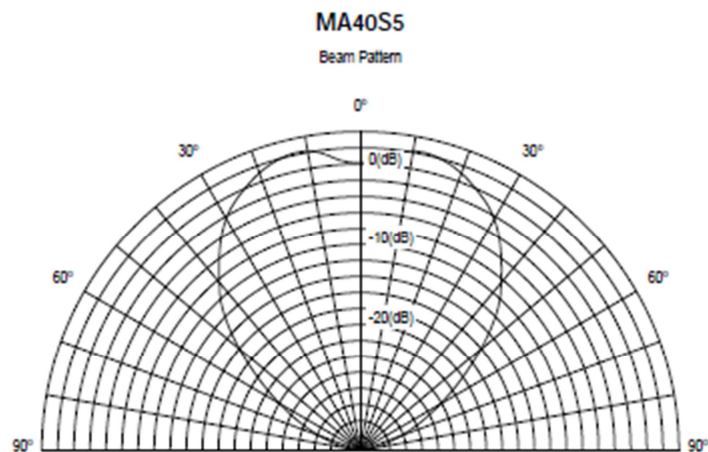


Figura 3.4 – Diretividade do transdutor ultrassônico (Murata P19E9).

3.2.2 Microcontrolador ATmega8535

O microcontrolador ATmega8535 da fabricante Atmel foi utilizado neste projeto por apresentar as seguintes características:

- Baixo custo;
- Frequência de 4 a 20MHz;
- 8 canais de conversor A/D, utilizado para leitura da temperatura;
- *Timers* para contagem de tempo entre a transmissão e recepção dos sinais;

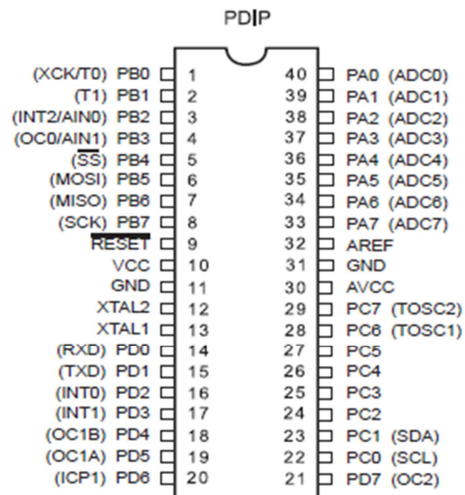


Figura 3.5 – Configuração dos pinos do ATmega8535 (Atmel).

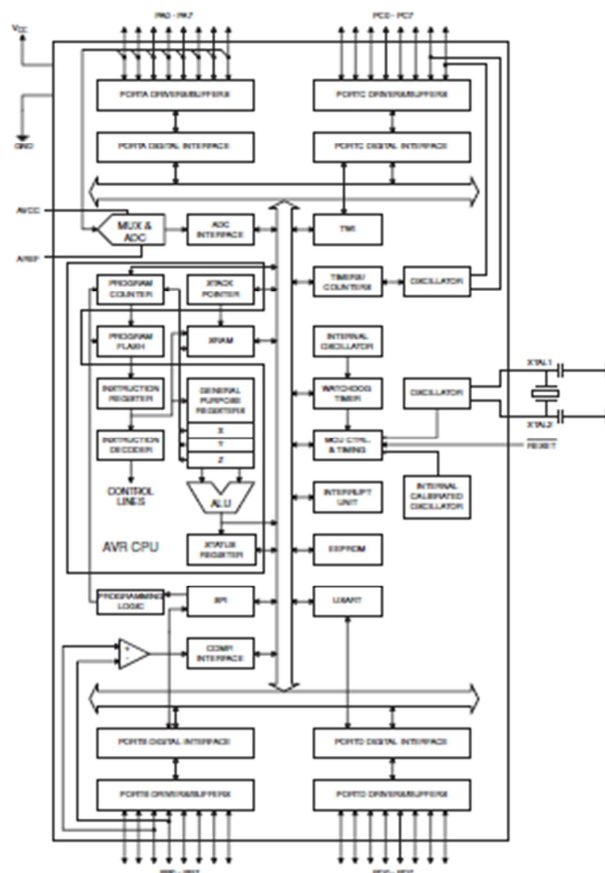


Figura 3.6 –Diagrama de blocos do microcontrolador ATmega8535 (Atmel).

- Saída serial conforme protocolo USART, utilizado para comunicação entre hardware e interface com o usuário.

O microcontrolador é responsável pelo controle de emissão e recepção de sinais dos transdutores e aquisição da temperatura a partir do sensor de temperatura. Também é responsável pela transmissão de dados via comunicação serial para o computador pessoal.

As Figuras 3.5 e 3.6 apresentam as configurações dos pinos e o diagrama de blocos do microcontrolador ATmega8535. Mais informações estão disponíveis no catálogo do fabricante Atmel.

3.2.3 Sensor de temperatura LM35

O sensor de temperatura LM35 é um sensor de precisão, fabricado pela National Semiconductor, que apresenta uma saída de tensão linear relativa à temperatura em que ele se encontrar no momento em que for alimentado por uma tensão de 4-20Vdc e GND (terra), tendo em sua saída um sinal de 10mV para cada Grau Celsius ($^{\circ}\text{C}$) de temperatura, sendo assim, apresenta uma boa vantagem com relação aos demais sensores de temperatura que são calibrados em “KELVIN”, não necessitando de nenhuma subtração de variáveis para que se obtenha uma escala de temperatura em Graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$).

Conforme apresentado na Figura 3.7, o sensor tem um acréscimo de 10mV para o aumento de 1°C .

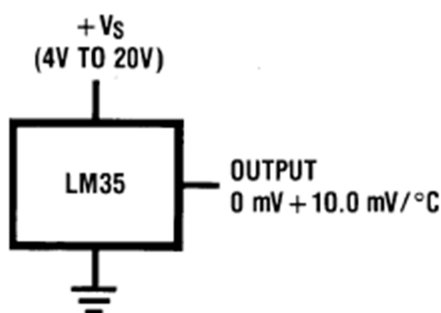


Figura 3.7 – Aplicação típica do sensor de temperatura LM35 (National).

Demais características deste sensor estão disponíveis no catálogo da fabricante National Semiconductor.

3.2.4 Fonte de Alimentação

A alimentação proposta será feita por baterias alcalinas com tensão nominal de 9V, este tipo de alimentação fornece autonomia ao sistema e praticidade de uso, sendo de baixo custo e fácil substituição por tratar-se de produto comercial.

3.3 Espaço Útil de Trabalho

A partir do arranjo proposto na Figura 3.1, pode ser feita a análise do espaço de trabalho formado pela intersecção dos cones dos lóbulos dos transdutores receptores. A análise para o posicionamento de quatro sensores receptores instalados em cada vértice da face superior de um cubo com arestas de 1 m de comprimento.

Para a diretividade do transdutor, considerou-se um ângulo de abertura de 90° do feixe de ultrassom, conforme Figura 3.4.

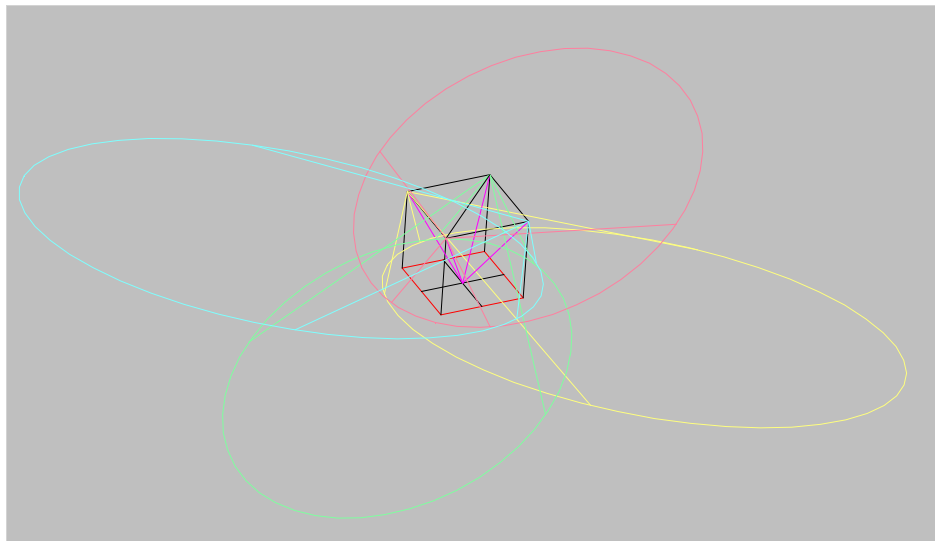


Figura 3.8 – Representação dos lóbulos cônicos dos receptores.

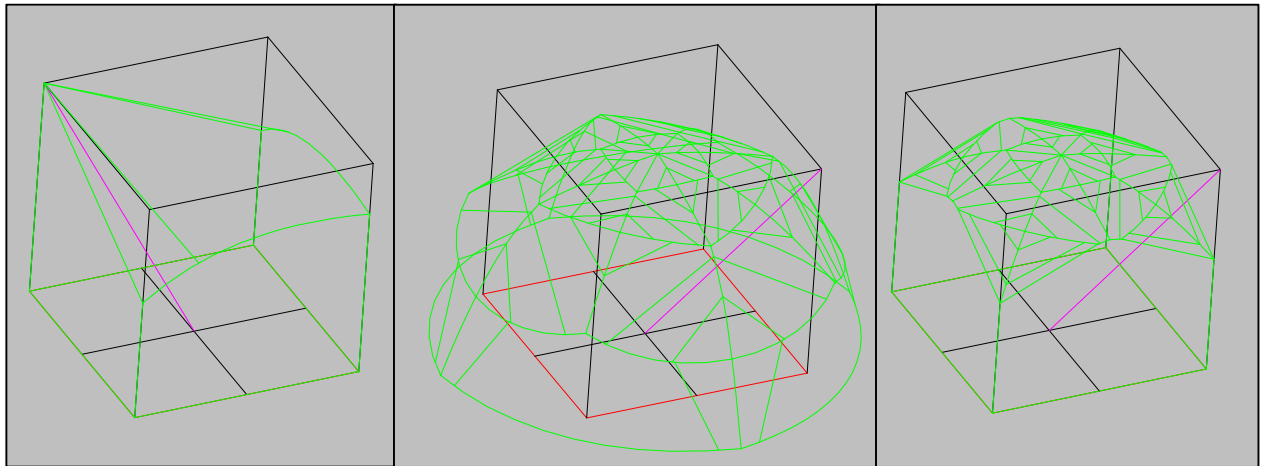


Figura 3.9 – Intersecção dos lóbulos receptores. A figura da esquerda representa o lóbulo de um receptor dentro do espaço de trabalho; a figura central representa o volume formado pela intersecção dos lóbulos dos quatro receptores; a figura da direita representa o volume útil dentro do espaço de trabalho.

	Lóbulo 90º para o centro
No espaço	
Volume total (m³)	1,4
Área projetada total (m²)	2,5
No volume de trabalho	
Volume útil (m³)	0,77
Altura mínima bordas (m)	0,55

Tabela 3.2 – Volume útil – intersecção dos cones de recepção.

3.4 Especificação de projeto

Neste tópico será especificado a resolução do sistema consequente da escolha do microcontrolador e verificar se o seu contador será suficiente para atender a distância máxima especificada.

O sinal de *clock* do microcontrolador possui frequência de 7,37MHz, sendo esta igual à frequência do cristal oscilador. Assim, a média de 1 ciclo por instrução é uma vantagem do microcontrolador ATmega8535 sobre os concorrentes. A razão entre a velocidade de propagação da onda, em torno de 344 m/s, e a frequência de *clock* fornece uma resolução de 0,05mm. Essa resolução de 0,05 mm fornece um tempo máximo a ser medido de 5,8 ms.

Como especificação de projeto, impõe-se uma distância máxima a ser medida de 2 m. O número máximo de contagens que o contador do microcontrolador estará submetido, para

este sistema, é igual ao produto entre o tempo máximo e a frequência de *clock*, resultando no valor 42746, valor este que está dentro dos limites de 16bits do microcontrolador utilizado.

3.5 Hardware

O projeto eletrônico proposto foi baseado nos princípios básicos para emissão e recepção de sinais utilizando transdutores de ultrassom que está representado na Figura 3.10.

O bloco OSC representa o cristal oscilador responsável pela frequência de *clock* do microcontrolador. O cristal utilizado tem frequência de 7,37 MHz, conforme apresentado anteriormente.

O bloco Emissor representa o driver responsável pelo tratamento do sinal, filtro e amplificador, para ser direcionado ao conjunto de transdutores emissores fixos ao objeto.

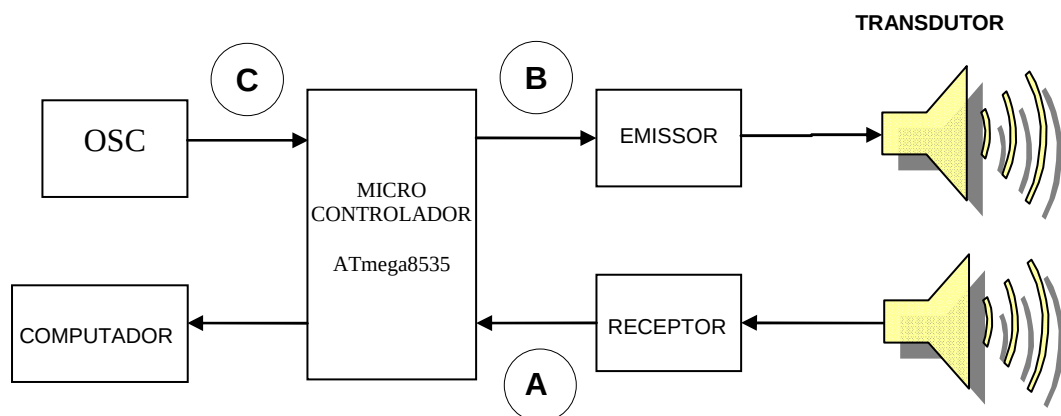


Figura 3.10 – Esquema do princípio de funcionamento do *hardware* de controle

O bloco Receptor abriga o driver responsável pela detecção do sinal de entrada fornecido pelo transdutor por meio de filtro amplificador, retificador e comparador para envio de sinal válido ao microcontrolador, sendo chaveado por um multiplexador.

A Figura 3.11 representa a carta de sinais indicados na Figura 3.10. O sinal em A é resultado da detecção de um sinal válido proveniente do receptor que estará distribuído pelo ambiente, ele será detectado pela janela que habilita a recepção no microcontrolador. O sinal em C representa a oscilação fornecida pelo cristal para o *clock* do microcontrolador. O sinal em B representa o sinal modulado a ser enviado para o conjunto transdutor emissor, sendo a

forma do sinal definida pelo fabricante do transdutor. Conforme Tabela 3.1, O circuito do emissor é projetado para enviar um trem de pulsos a 40Khz com comprimento de 1ms e intervalo de 25ms.

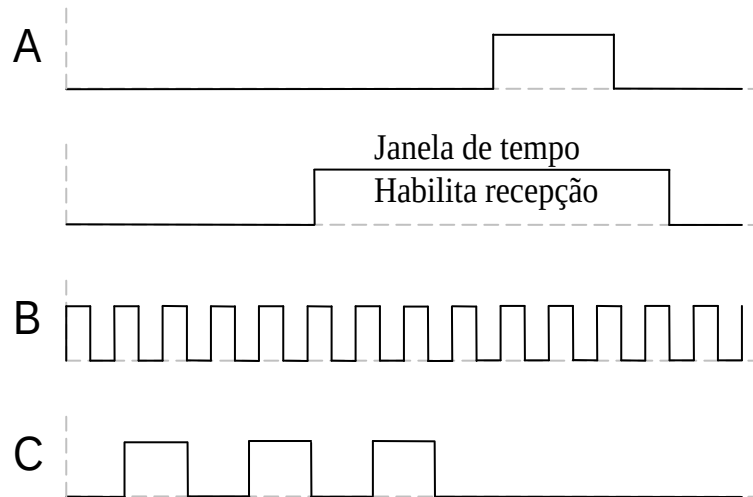


Figura 3.11 – Carta de tempo dos sinais.

3.6 Software

3.6.1 Software embarcado

O software embarcado proposto, gravado na memória do microcontrolador ATmega8535, utilizada a filosofia apresentada na Figura 3.12 e 3.13 e 3.14.

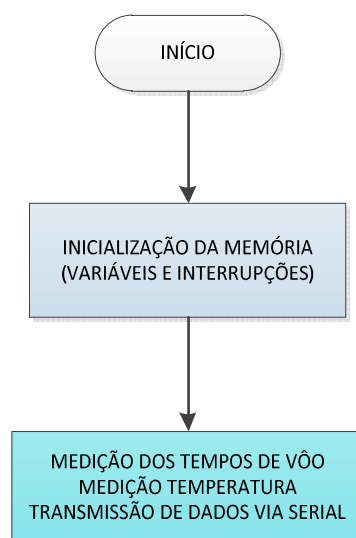


Figura 3.12 – Diagrama de blocos principal do sistema.

O último bloco da Figura 3.12 representa o *loop* infinito para o qual o sistema é direcionado e está detalhado na Figura 3.13.

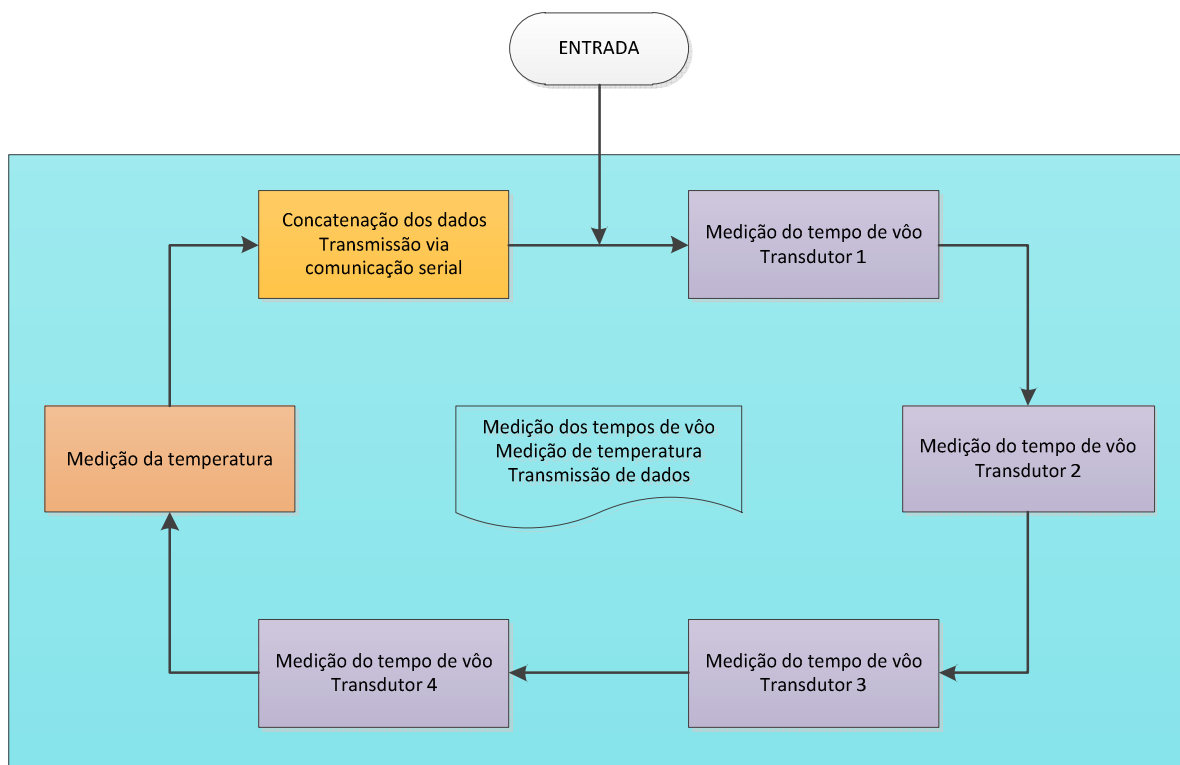


Figura 3.13 – Diagrama de blocos – *loop* infinito do sistema.

Os blocos de medição de tempo da Figura 3.13 são formados pela filosofia de operação apresentados na Figura 3.14. Nesta última, o bloco de seleção do receptor é constituído fisicamente por um componente multiplexador, que direciona a medida do receptor selecionado.

3.6.2 Software de interface com o usuário

O software de interface com o usuário proposto é desenvolvido em Visual Basic e utiliza a biblioteca MSComm para aquisição de dados na porta serial do computador pessoal. A sua filosofia utilizada está apresentada na Figura 3.15.

A proposta é programar um software que execute um *loop* infinito para processar os dados de chegada. Para isso, utiliza-se um *timer* com tempo de recorrência para execução dos processos.

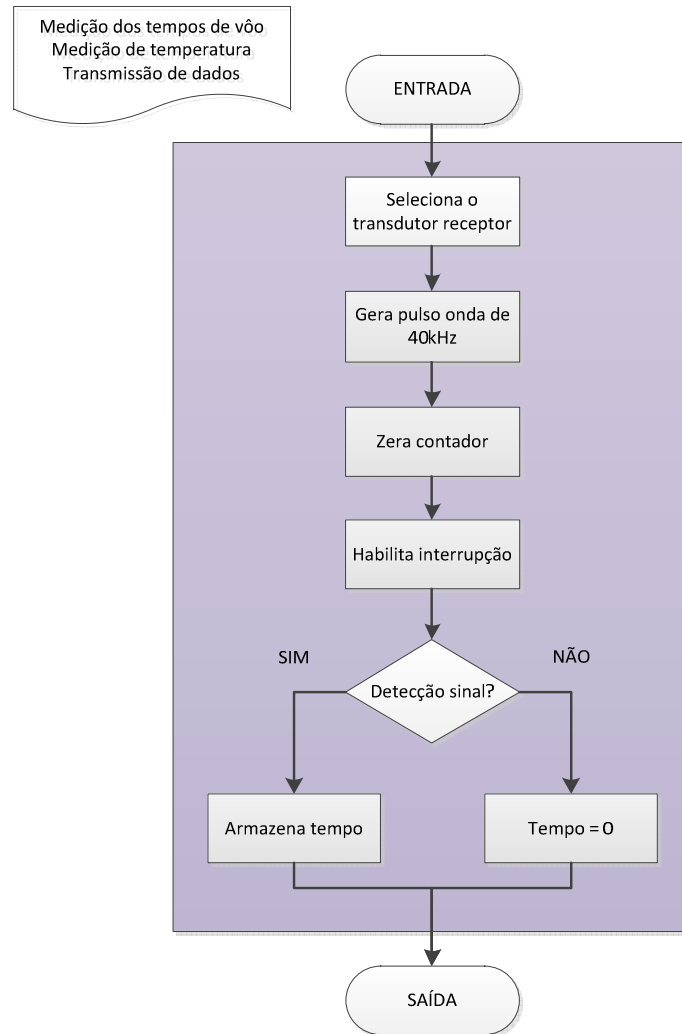


Figura 3.14 – Diagrama de blocos – medição do tempo de voo.

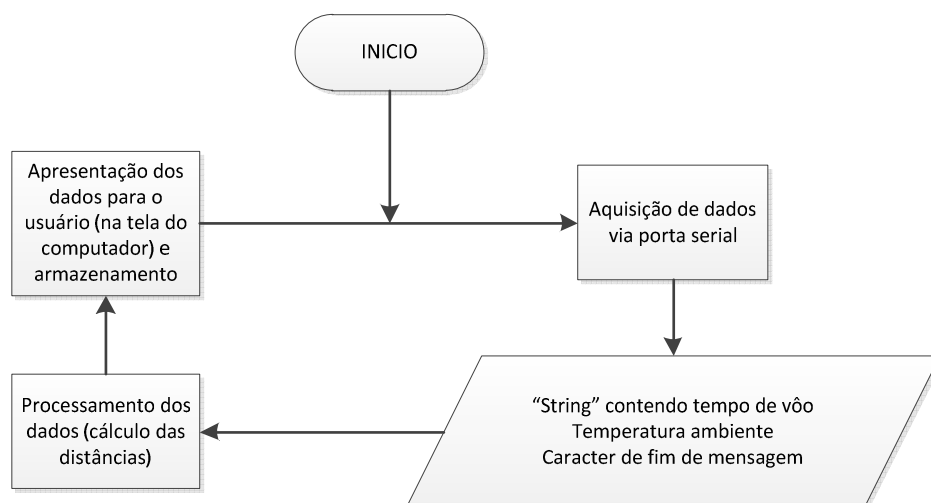


Figura 3.15 – Diagrama de blocos – interface com o usuário.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Ensaios Preliminares

Primeiramente foram realizados testes com o transdutor escolhido MA40S5. Verificou-se a frequência de ressonância do transdutor MA40S5 para comparação com o valor fornecido pelo fabricante Murata e, também, determinou-se o valor dos componentes que integram o circuito equivalente da cerâmica piezoelétrica. Essas análises foram realizadas no impedômetro disponível do Laboratório de Sensores e Atuadores do Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

A partir dos resultados de análise de impedância elétrica do transdutor, foram traçadas as curvas do módulo e fase da impedância elétrica, Figura 4.1. Os valores extraídos para frequência de ressonância F_r e anti-ressonância F_a foram 38,48 kHz e 41,33 kHz, respectivamente. Sendo 40 kHz o valor nominal da frequência de ressonância dada pelo fabricante, o erro obtido foi de 3,8%.

A impedância elétrica de um transdutor é importante para a montagem do circuito de excitação, pois para que o transdutor opere de maneira eficiente, o circuito de excitação deve possuir a mesma impedância elétrica.

Determinou-se o circuito elétrico equivalente, isto é, uma combinação de capacitor, indutor e resistor que apresenta uma impedância elétrica muito próxima do transdutor. Este circuito é chamado de circuito equivalente de Maison (Murata P19E9). Os resultados obtidos são apresentados na Figura 4.2.

A partir da equação (4.1) que representa a impedância equivalente do circuito de Maison, é possível comparar os resultados das impedâncias da cerâmica que constitui o transdutor e o seu circuito equivalente, vide Figura 4.3. Observa-se uma sobreposição das curvas o que indica resultado coerente para os métodos.

$$Z = \frac{\frac{1}{j \cdot \omega \cdot C_0} \cdot \left(j \cdot \omega \cdot L + \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C_1} + R \right)}{\frac{1}{j \cdot \omega \cdot C_0} + j \cdot \omega \cdot L + \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C_1} + R} \quad (4.1)$$

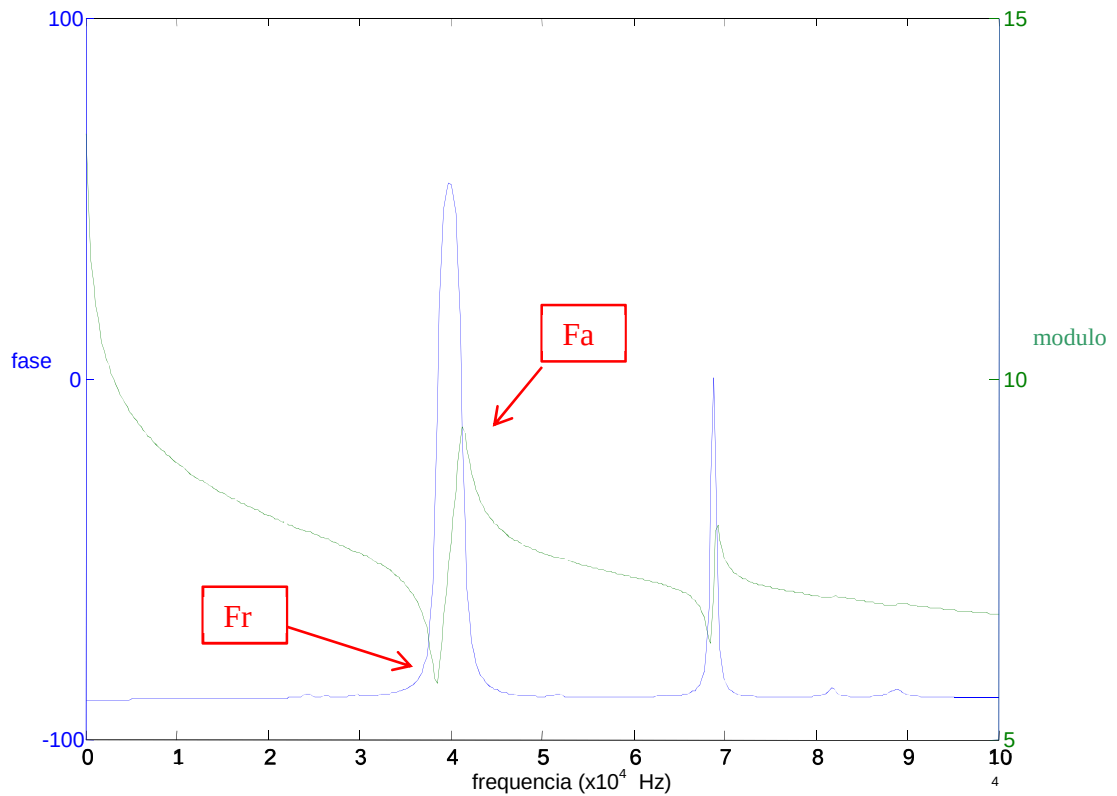
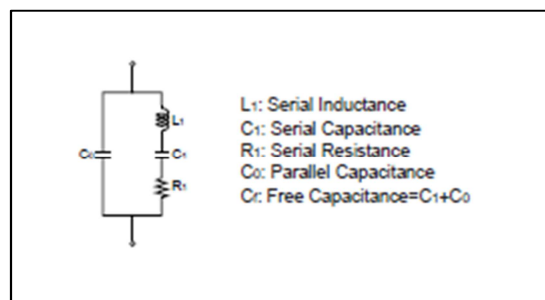


Figura 4.1 - Impedância elétrica para o transdutor MA40S5. Frequência de ressonância (F_r) e anti-ressonância (F_a).



$$\begin{aligned} C_0 &= 1,958 \text{ nF} \\ C_1 &= 282,890 \text{ pF} \\ R_1 &= 325,896 \text{ } \Omega \\ L_1 &= 60,182 \text{ mH} \end{aligned}$$

Figura 4.2 – Circuito equivalente para a cerâmica piezoelétrica do transdutor.

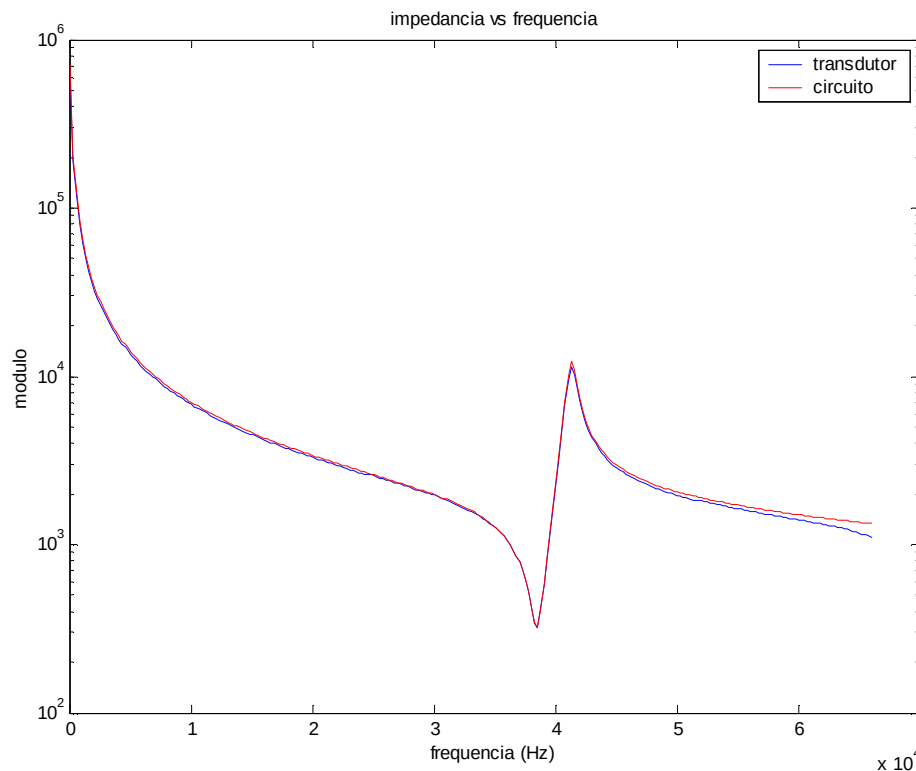


Figura 4.3 – Sobreposição das curvas do módulo de impedância do transdutor e do circuito equivalente.

Com os valores das frequências de ressonância e anti-ressonância determina-se o fator de acoplamento mecânico para o modo de espessura longitudinal $kt = 0,42$, equação (2.22).

4.2 Hardware

O projeto do circuito eletrônico foi realizado em paralelo com sua construção, estas duas fases estão representadas nas Figuras 4.4 e 4.5, respectivamente.

O circuito atende ao propósito do trabalho, apresentando robustez e, principalmente, durabilidade.

Um ponto a ser discutido é a necessidade de ter fontes de alimentação separadas para o circuito emissor e o receptor. Constataram-se sinais de ruído quando da habilitação da janela para recepção dos sinais. Dessa forma, o bloco do circuito responsável pela alimentação do microcontrolador, do sensor de temperatura e do circuito de emissão é alimentado por duas baterias alcalina de 9V disposta numa associação em paralelo. Já a parte do circuito responsável pela recepção dos sinais está sendo alimentada isoladamente por uma bateria alcalina de 9V.

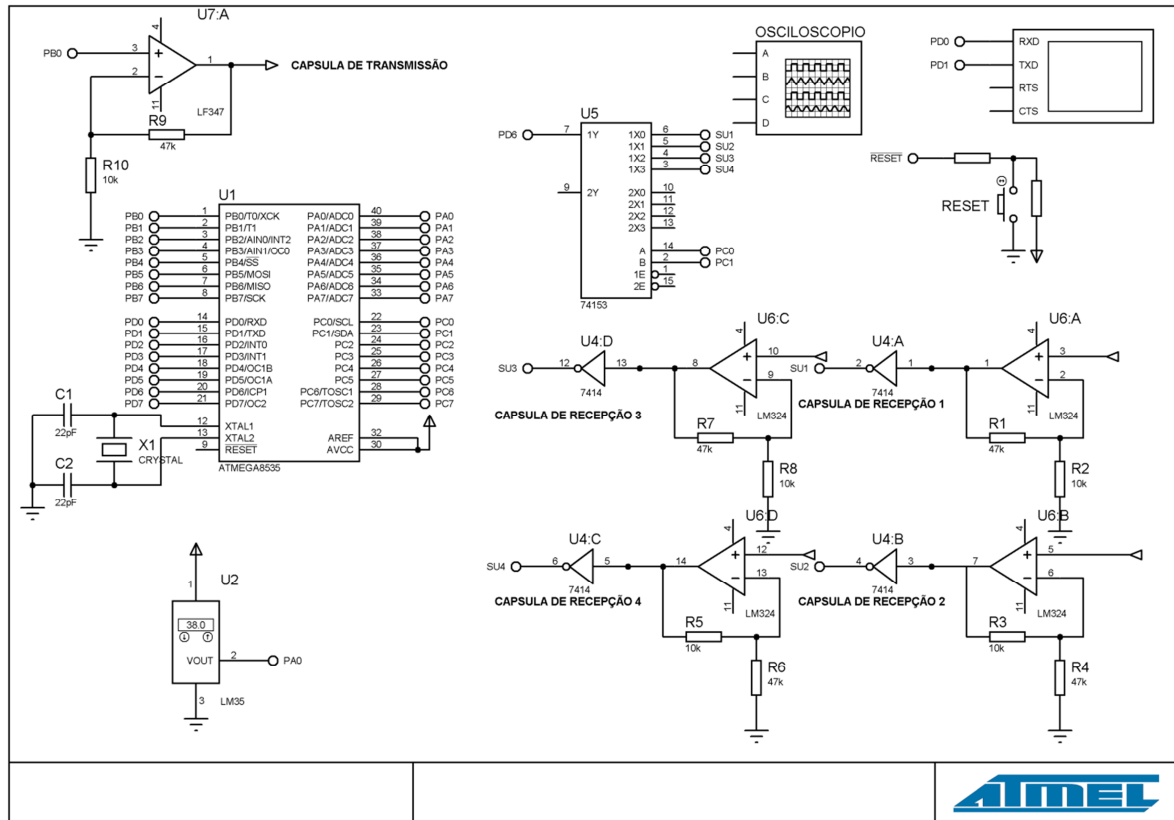


Figura 4.4 – Projeto do circuito eletrônico.

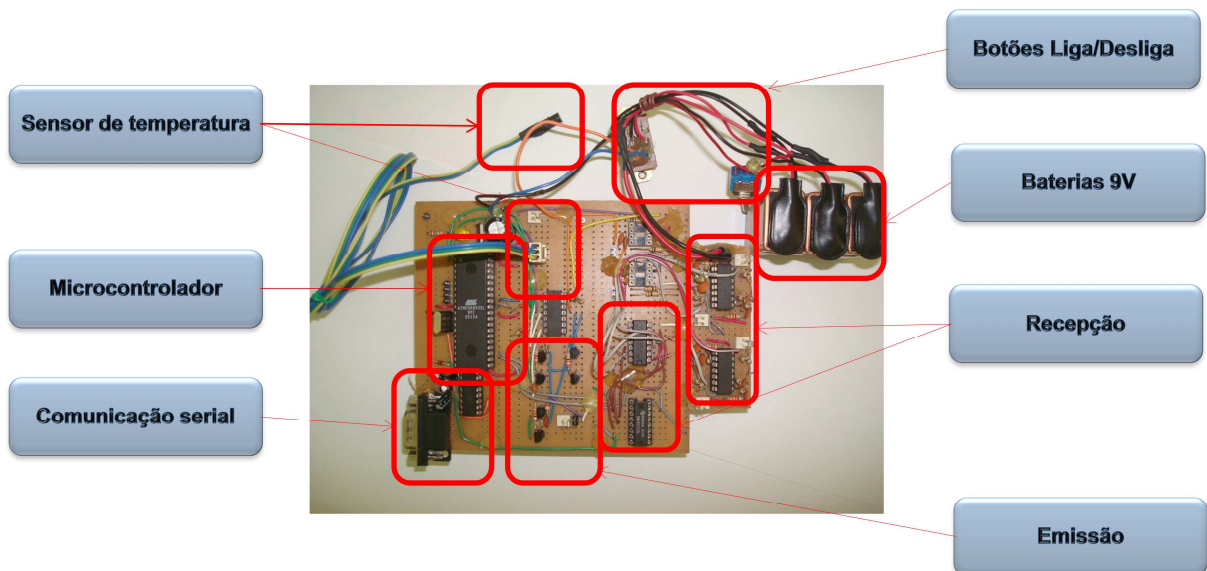


Figura 4.5 – Protótipo do circuito eletrônico.

4.3 Software

4.3.1 Software embarcado

O software embarcado foi implementado conforme o sua filosofia de projeto, item 3.6.1. O seu código fonte, escrito em linguagem C e gravado no microcontrolador pelo programa AVR Studio da fabricante Atmel, consta no Apêndice A.

4.3.2 Software de interface com o usuário

A implementação do software de interface com o usuário foi feita utilizando-se a ferramenta IDE Visual Basic ®. O código-fonte do módulo principal, que representa o *loop* infinito descrito anteriormente, consta no Apêndice C. A tela de interface está representada na Figura 4.6. Os campos disponíveis na tela de interface fornecem os valores das medidas feitas pelo sistema e são suficientes para o propósito deste projeto.

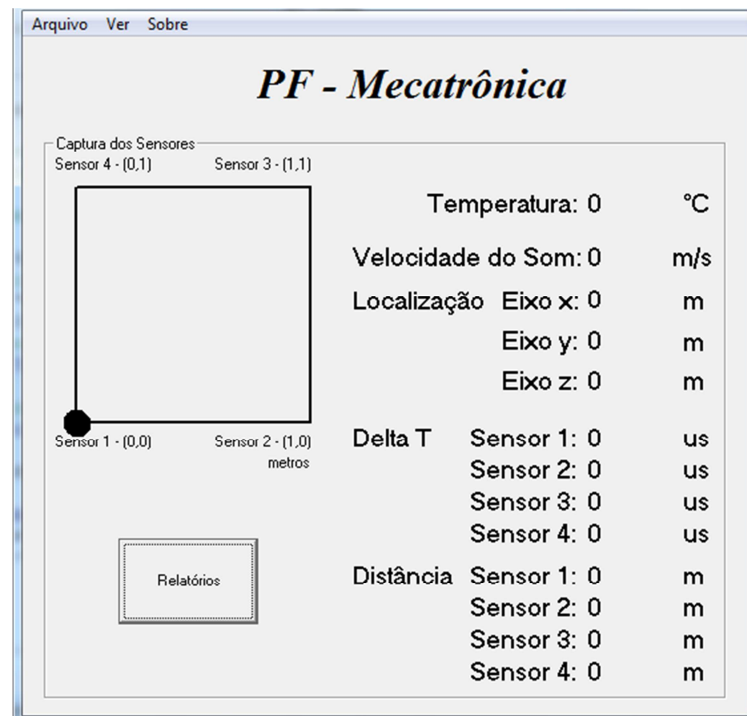


Figura 4.6 – Tela de interface com o usuário.

Vale ressaltar que a implementação do método de Newton-Raphson, para a localização do objeto, tornou-se inviável dentro do ambiente Visual Basic devido ao volume de processamento requerido por tal método. A programação no ambiente Visual Basic retornava mensagens de overflow quando do início do seu processamento. Dessa forma, utilizou-se uma ponderação das distâncias medidas no cálculo das coordenadas Eixo X e Eixo Y na tela de interface. Para contornar esse problema, um *script* desenvolvido para o software Matlab® foi utilizado para gerar os resultados apresentados neste trabalho. Esse código consta no Apêndice B.

Foi com sucesso que o armazenamento dos resultados foi programado nesta plataforma. O princípio para a comunicação entre *hardware* e *software* baseou-se na manipulação de objetos do tipo *String*, conforme pode ser visto no código fonte, Apêndice C.

4.4 Arranjo Físico do Sistema

Como proposta preliminar, o projeto previa o arranjo apresentado na Figura 4.7. Porém este se tornou inviável, pois a caixa que delimitava o espaço mostrou-se um problema, uma vez que as ondas acústicas refletiam em sua superfície gerando imprecisões e resultados incorretos das leituras.



Figura 4.7 – Primeira alternativa proposta.

Para solucionar o problema apresentado acima, o de múltiplas reflexões nas paredes da caixa, após realizações alguns testes foi proposto um arranjo físico conforme apresentado na Figura 4.8. Este novo conceito mostrou-se viável para atingir os objetivos propostos.



Figura 4.8 – Segunda alternativa proposta.

O problema que pode ser apontado nesta segunda alternativa não diz respeito à reflexão de ondas, mas ao processo de detecção. A diretividade do transdutor emissor não

possibilitava a captura das ondas pelos quatro sensores receptores. A solução deste problema foi que, ao invés de utilizar-se de um único emissor fixo ao objeto, a emissão é feita por um conjunto de emissores que simulem um transdutor omnidirecional, conforme pode ser visto na Figura 4.9.



Figura 4.9 – Conjunto de emissores fixados no objeto.

Dessa maneira chega-se a solução final do arranjo, o qual está representado na Figura 4.10. Essa configuração permitiu a realizações dos testes que geraram os resultados apresentados no item a seguir.

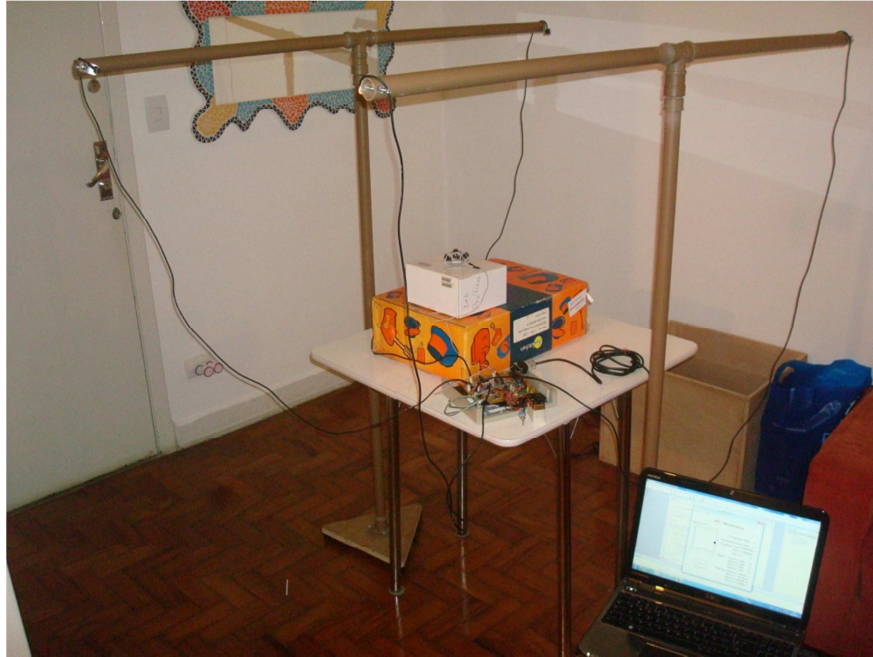


Figura 4.10: Terceira alternativa proposta – arranjo final.

4.5 Testes

A tela de interface da Figura 4.11 e o arquivo de armazenamento dos dados, Figura 4.12, são resultados de testes gerados para uma configuração semelhante à apresentada na Figura 4.10.

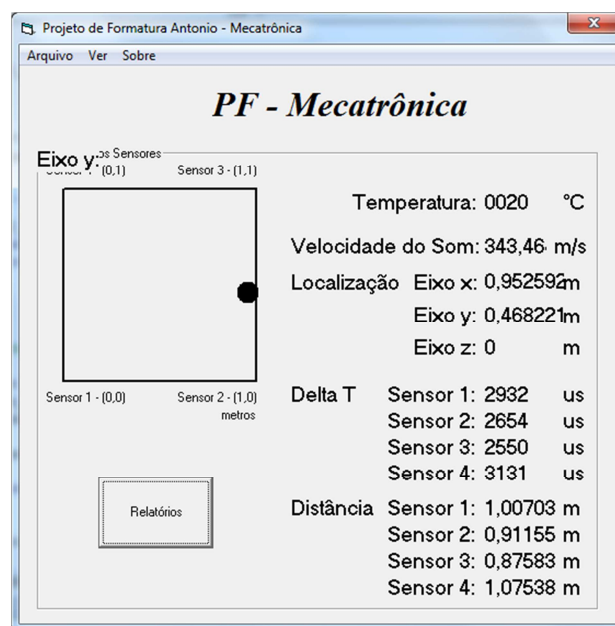


Figura 4.11: Tela de interface – resultado dos testes.

"Dia "---	Hora ----	Temperatura -----	Posição" -----"			
"30/06/2011	23:52:52	0020°C	1,00703	0,90846	0,87583	1,07264"
"30/06/2011	23:52:54	0020°C	1,00703	0,90846	0,87583	1,07264"
"30/06/2011	23:52:55	0020°C	1,00703	0,91739	0,87583	1,07264"
"30/06/2011	23:52:57	0020°C	1,00703	0,91155	0,87583	1,07538"
"30/06/2011	23:52:58	0020°C	1,00703	0,90846	0,87583	1,07264"
"30/06/2011	23:53:00	0020°C	1,00703	0,90846	0,87583	1,07264"
"30/06/2011	23:53:02	0020°C	1,00703	0,91739	0,87583	1,07538"
"30/06/2011	23:53:03	0020°C	1,00703	0,92048	0,87583	1,07264"
"30/06/2011	23:53:05	0020°C	1,00703	0,91155	0,87583	1,07538"
"30/06/2011	23:53:07	0020°C	1,00703	0,91155	0,87583	1,07538"

Tabela 4.1: Arquivo de armazenamento de dados.

A Tabela 4.2 apresenta o resumo dos dados adquiridos e armazenados, num total 100 leituras que resultam nos valores médios das distâncias que serão inseridas como dados de entrada para o cálculo da localização. A Tabela completa consta no Apêndice E.

	Temperatura		Distâncias [m]			
	[°C]	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4	
1	20	1,00703	0,90846	0,86381	1,07264	
2	20	1,00703	0,90846	0,87583	1,07264	
3	20	1,00703	0,91155	0,87583	1,07538	
4	20	1,00978	0,90846	0,86690	1,07538	
5	20	1,00703	0,91155	0,87583	1,07538	
6	20	1,00978	0,90846	0,87583	1,07538	
7	20	1,00978	0,90846	0,87583	1,07538	
8	20	1,00978	0,90846	0,87583	1,07538	
9	20	1,00978	0,90846	0,87583	1,07538	
10	20	1,00978	0,90846	0,87583	1,07538	
...						
...						
...						
98	20	1,00703	0,90846	0,87274	1,07538	
99	20	1,00703	0,90846	0,87274	1,07538	
100	20	1,00703	0,90846	0,87274	1,07538	
Mín.	20	1,0070	0,9085	0,8638	1,0726	
Máx.	20	1,0098	0,9205	0,8758	1,0754	
Média	20	1,0077	0,9100	0,8748	1,0742	
Desvio	0	0,0012	0,0025	0,0021	0,0014	
Valor medido		1,00	0,87	0,86	1,09	
Erro (%)		0,77%	4,60%	1,72%	1,45%	

Tabela 4.2: Tabela resumo dos resultados obtidos pelo sistema de localização.

A Tabela 4.3 apresenta os dados de entrada para executar a rotina iterativa que busca a minimização da somatória dos erros quadráticos pelo método de Newton-Raphson. A coluna P_0 representa o ponto inicial.

	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4	P_0
X	0,000000	1,500000	1,415412	-0,08375	0,000
Y	0,000000	0,000000	0,745276	0,795546	0,000
Z	1,500000	1,400000	1,500000	1,400000	0,000
Distâncias	1,007700	0,910000	0,874800	1,074200	

Tabela 4.3: Dados de entrada para o método de Newton-Raphson.

Os resultados do método de Newton-Raphson para minimizar a somatória dos erros quadráticos estão representados na Tabela 4.4, que está representada pelos gráficos nas Figuras 4.12, 4.13, 4.14 e 4.15.

	Iteração											Objeto
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
X	0,0000	0,8563	0,7811	0,8275	0,7889	0,8064	0,7946	0,7995	0,7965	0,7979	0,7971	0,80
Y	0,0000	0,3340	0,3451	0,3489	0,3566	0,3599	0,3636	0,3654	0,3670	0,3678	0,3684	0,35
Z	0,0000	1,1772	1,1252	1,0585	1,0295	1,0056	0,9968	0,9909	0,9888	0,9875	0,9871	1,05
Erro^2	31,4026	0,1004	0,0550	0,0237	0,0092	0,0042	0,0027	0,0024	0,0023	0,0022	0,0022	
%		0,9968	0,4517	0,5691	0,6101	0,5478	0,3427	0,1369	0,0407	0,0113	0,0032	
Distancia	1,3657	0,1400	0,0777	0,0288	0,0242	0,0459	0,0551	0,0610	0,0636	0,0650	0,0656	
%		0,8975	0,4448	0,6299	0,1585	0,8969	0,2004	0,1071	0,0416	0,0224	0,0097	

Tabela 4.4: Resultados da iteração do método de Newton-Raphson.

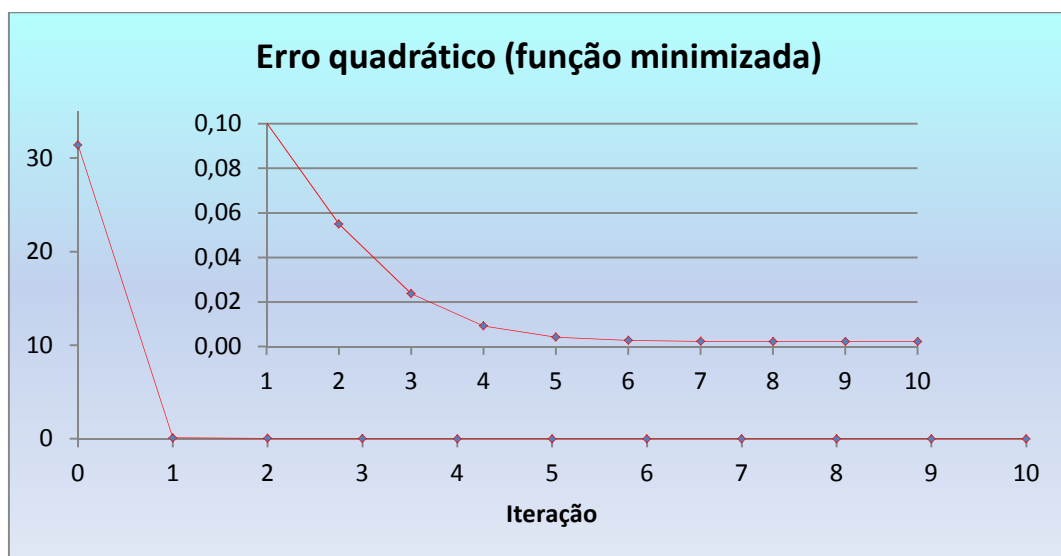


Figura 4.12: Evolução do erro quadrático com o número de iterações.

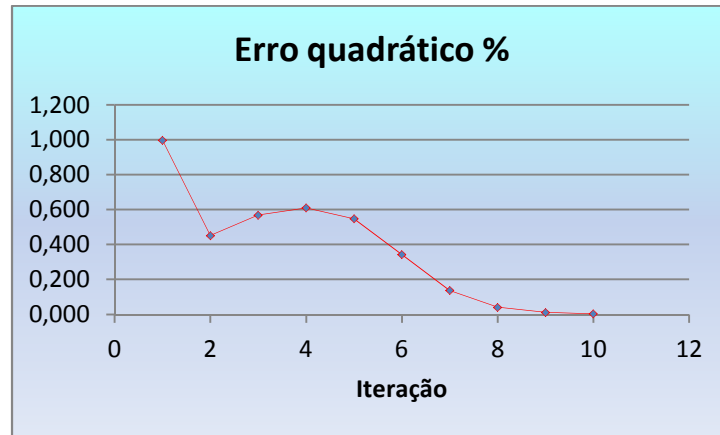


Figura 4.13: Evolução do percentual do erro quadrático com o número de iterações.



Figura 4.14 – Evolução da distância à solução exata com o número de iterações.



Figura 4.15: Evolução do erro percentual da distância com o número de iterações.

O método apresentou convergência conforme apresentado na Figura 4.12 entre os pontos 4 e 10, o erro quadrático é minimizado, mesmo que isso implique no aumento da distância à solução exata.

As Figuras 4.16 e 4.17 apresentam as esferas que são utilizadas no equacionamento e na localização do objeto. Também nesta figura é apresentado o caminho percorrido no espaço pelo método de Newton-Raphson de acordo com o número do passo da iteração. Pode-se verificar que o método aproxima-se do resultado esperado rapidamente, já na primeira iteração, o que também é confirmado pela Figura 4.14.

Demais resultados dos testes são apresentados nos Apêndices D e E.

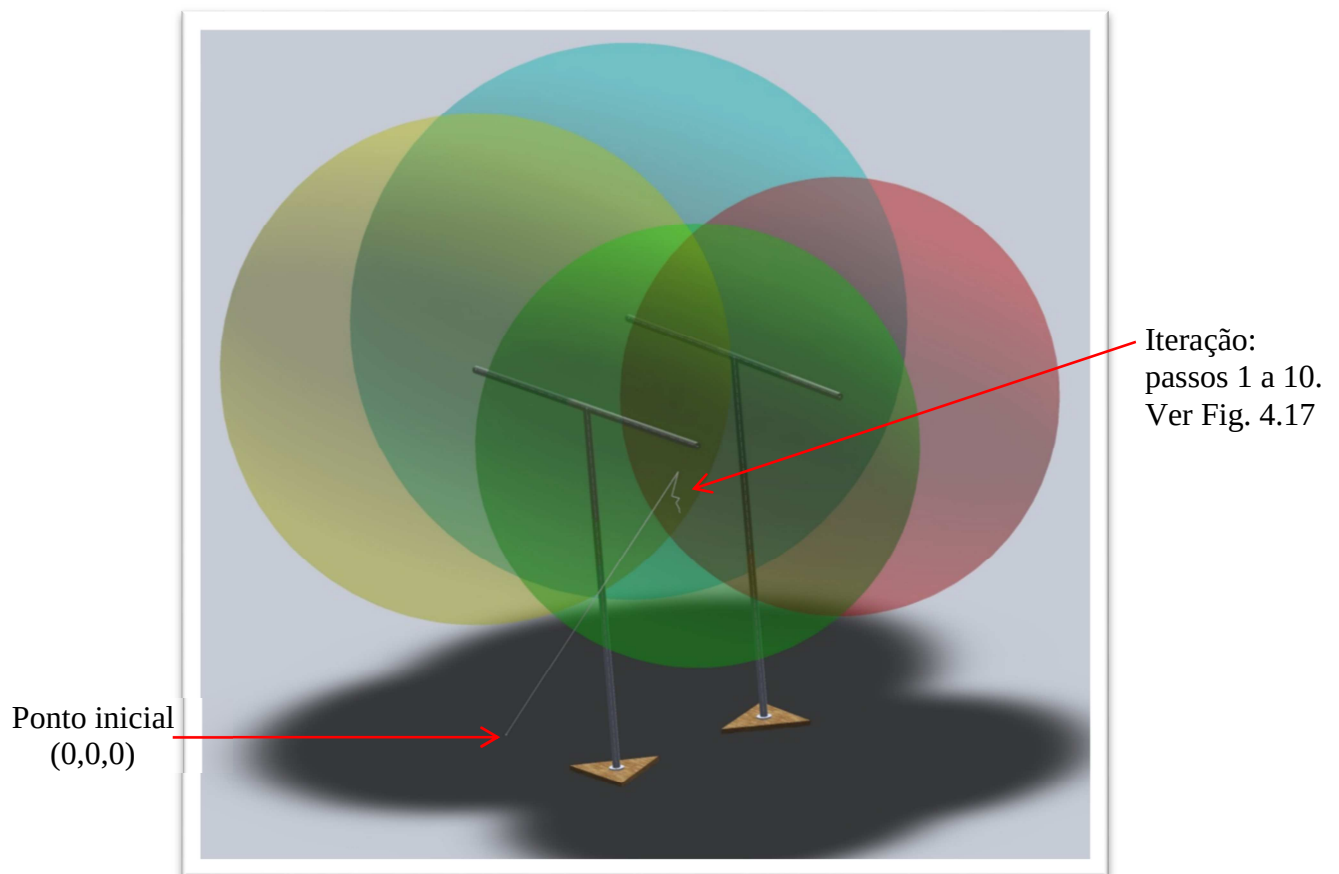


Figura 4.16: Representação da intersecção de esferas e do método de localização utilizado.



Figura 4.17: Visualização espacial da convergência do método de Newton-Raphson.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente trabalho foram apresentados o projeto, o desenvolvimento e construção de um sistema de posicionamento que utiliza ondas de ultrassom que se propagam no ar numa frequência de 40kHz. Foram utilizados sensores de ultrassom modelo MA40S5 da fabricante Murata®, que operam numa frequência de ressonância de 40kHz verificada. Estes sensores foram distribuídos pelo ambiente formando um referencial pré-determinado, no qual cada um dos quatro vértices de um retângulo foi constituído por um transdutor operando no modo receptor. No objeto a ser localizado foram posicionados transdutores que operam no modo emissor.

No decorrer do projeto surgiram alguns problemas: múltiplas reflexões das ondas acústicas que tornavam as leituras das distâncias incorretas e diretividade do emissor. As soluções para estes problemas foram propostas, testadas e verificadas como válidas para atingir o objetivo do sistema.

Não foram testadas alternativas de arranjos, como por exemplo, inversão entre os transdutores emissores e receptores ou, de acordo com (Santos, 2006) apud (Costa, 2003) a alternativa de emissores dispostos numa calota semiesférica poderia ser substituída por uma fonte que utilizasse obstáculo vazado de pequenas dimensões em relação ao comprimento de onda do sinal transmitido, sendo um procedimento fácil e económico.

O sistema, tanto a parte estrutural como hardware e arranjo dos transdutores, quanto à parte virtual como softwares e métodos matemáticos mostraram-se uma alternativa funcional para a localização de objetos, conforme objetivos deste trabalho.

Como possibilidade de sequência de pesquisa, ressalta-se a necessidade de estudo e análise do campo acústico gerado por um transdutor e a interferência nos campos acústicos gerados por múltiplos emissores. Também pode ser citado método de localização que se baseia em tais reflexões de ondas (Dijk, 2004).

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. Escola Politécnica. Divisão de Biblioteca. **Diretrizes para apresentação de dissertações e teses**. 3. ed. São Paulo, 2006. 103 p.

KINSLER, L. W.; FREY, A. R.; COPPENS, A. B.; SANDERS, J. V. **Fundamentals of acoustics**. 3. ed. New York: Wiley, 1982.

MILNE, P. H. **Underwater acoustic positioning systems**. 2. ed. Inglaterra: Gulf, 1983.

MATUDA, M., **Medidor de distância por ultrassom**. 1993. 49 p. Dissertação (Graduação) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

ESTÉVEZ, L. C. **Sensor ultrasonico adaptativo de medidas de distancias. Aplicacion en el campo de la robótica**. Madri: Editorial de la Universidade Complutense de Madrid, 1989.

SANTOS, A. O. **Desenvolvimento de sistema de sensoramento de posição e atuação para posicionamento dinâmico de modelos reduzidos em tanques de provas**. 2005. 232 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005.

MURATA MANUFACTURING CO LTDA. **Piezoelectric ceramics sensors**. [S.l.], [20-?]. 21 p. (P19E). Disponível em: <<http://www.murata.com/catalog/p19e9.pdf>>. Acesso em: 05 mar. 2008.

MURATA MANUFACTURING CO LTDA. **Ultrasonic sensors**. [S.l.], [20-?]. 14 p. (S15E). Disponível em: <<http://www.murata.com/products/catalog/pdf/s15e.pdf>>. Acesso em: 10 jun. 2011.

ATMEL. **ATmega8535**. [S.l.], [20-?]. 321 p. Disponível em: < http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc2502.pdf >. Acesso em: 10 jun. 2011.

NATIONAL SEMICONDUCTORS. **LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors**. [S.l.], [20-?]. 13 p. Disponível em: < <http://www.national.com/mpf/LM/LM35.html> >. Acesso em: 10 jun. 2011.

DIJK, E. O. **Indoor ultrasonic position estimation using a single base station**. 2004. 238 p. Tese (PHD). Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven. 2004.

Apêndice A - Código-Fonte do Microcontrolador

main.c

```
#include <avr/io.h>
#include <math.h>
#include <string.h>
#include <stdlib.h>
#include <util/delay.h>
#include "usart.h"
#include "temp.h"
#include "i2s.h"
#include "generator.h"
#include "multiplexer.h"
#define F_CPU 7.3728E6

int temp, sensor_um, sensor_dois, sensor_tres, sensor_quatro;
char serial[255], adc[7], sensor_one[32], sensor_two[32], sensor_three[32], sensor_four[32];

int main(){
    DDRA = 0x00;
    DDRD = 0x00;

    usart_init(47);
    TCCR1B = (1<<CS11) | (1<< CS10);

    while(1){
        // Gera uma onda de 40 KHz na cápsula 1.
        switch_sensor(1);
        generator(20);
        TCNT1 = 0;
        // Recebe um sinal de interrupção na cápsula 1.
        while((PIND & (1<<6)) && TCNT1 < 65530);
        if(!((PIND & (1<<6)))){
```

```

    _delay_us(5);
    while((PIND & (1<<6)) && TCNT1 < 65530);
    if(!((PIND & (1<<6))))
        sensor_um = TCNT1;
    else
        sensor_um = 0;
}
if(sensor_um != 0)
    sensor_um = (sensor_um * 8.68) + 250;
itoa (sensor_um, sensor_one, 10);
_delay_ms(200);
_delay_ms(200);
sensor_um = 0;

// Gera uma onda de 40 KHz na cápsula 2.
switch_sensor(2);
generator(20);
TCNT1 = 0;
// Recebe um sinal de interrupção na cápsula 1.
while((PIND & (1<<6)) && TCNT1 < 65530);
if(!((PIND & (1<<6)))){
    _delay_us(5);
    while((PIND & (1<<6)) && TCNT1 < 65530);
    if(!((PIND & (1<<6))))
        sensor_dois = TCNT1;
    else
        sensor_dois = 0;
}
if(sensor_dois != 0)
    sensor_dois = (sensor_dois * 8.68) + 250;
itoa (sensor_dois, sensor_two, 10);
_delay_ms(200);
_delay_ms(200);
sensor_dois = 0;

```

```

// Gera uma onda de 40 KHz na cápsula 3.
switch_sensor(3);
generator(20);
TCNT1 = 0;
// Recebe um sinal de interrupção na cápsula 3.
while((PIND & (1<<6)) && TCNT1 < 65530);
if(!((PIND & (1<<6)))){
    _delay_us(5);
    while((PIND & (1<<6)) && TCNT1 < 65530);
    if(!((PIND & (1<<6))))
        sensor_tres = TCNT1;
    else
        sensor_tres = 0;
}
if(sensor_tres != 0)
    sensor_tres = (sensor_tres * 8.68) + 250;
itoa (sensor_tres, sensor_three, 10);
_delay_ms(200);
_delay_ms(200);
sensor_tres = 0;

// Gera uma onda de 40 KHz na cápsula 4.
switch_sensor(4);
generator(20);
TCNT1 = 0;
// Recebe um sinal de interrupção na cápsula 4.
while((PIND & (1<<6)) && TCNT1 < 65530);
if(!((PIND & (1<<6)))){
    _delay_us(5);
    while((PIND & (1<<6)) && TCNT1 < 65530);
    if(!((PIND & (1<<6))))
        sensor_quatro = TCNT1;
    else
        sensor_quatro = 0;
}

```

```

    if(sensor_quatro != 0)
        sensor_quatro = (sensor_quatro * 8.68) + 250;
    itoa (sensor_quatro, sensor_four, 10);
    _delay_ms(200);
    _delay_ms(200);
    sensor_quatro = 0;
    temp = (read_temp (0) / 10);
    i2s(adc, temp);
    strcpy (serial, sensor_one);
    strcat (serial, ";");
    strcat (serial, sensor_two);
    strcat (serial, ";");
    strcat (serial, sensor_three);
    strcat (serial, ";");
    strcat (serial, sensor_four);
    strcat (serial, ";");
    strcat (serial, adc);
    strcat (serial, ";");
    strcat (serial, "$");
    usart_transmit_string(serial);
}
}

```

generator.c

```

#include "generator.h"
void generator(int times){
    DDRB = 0xFF;
    int i;
    for(i = 0; i < times; i++){
        PORTB = 0x01;
        _delay_us(12.5);
        PORTB = 0x00;
        _delay_us(12.5);
    }
}

```

multiplex.c

```
#include "multiplexer.h"

void switch_sensor(int sensor){
    DDRC = 0xFF;
    if(sensor == 1){
        PORTC = 0x00; //0b00000000
    }
    if(sensor == 2){
        PORTC = 0x01; //0b00000001
    }
    if(sensor == 3){
        PORTC = 0x02; //0b00000010
    }
    if(sensor == 4){
        PORTC = 0x03; //0b00000011
    }
}
```

adc.c

```
#include <avr/io.h>
#include "adc.h"

#define SETBIT(ADDRESS,BIT) (ADDRESS|=(1<<BIT))
#define CLEARBIT(ADDRESS,BIT) (ADDRESS&=~(1<<BIT))
#define PORT_DIR_A DDRA

int read_single_adc(unsigned char channel){
    char *pointer;
    int read;

    PORT_DIR_A=0x00;
    ADMUX = 0x40;
    SETBIT(ADCSRA,ADEN);           // Habilita ADC
    ADMUX |= channel;              // Selecciona canal - (0 - 7)
    ADCSRA |= 0x07;
```

```

pointer=(char *) &read;

SETBIT(ADCSRA,ADSC);           // Começa a conversação
ADCSRA|=0x07;                   // Prescaler Select - 110 - 64

while(!(ADCSRA & 1<<ADIF));    // Aguarda até que a conversão esteja
encerrada.

if ((ADCSRA & 1<<ADIF))        // Verifica se a conversão está pronta.
{
    *pointer = ADCL;
    *(pointer+1) = ADCH;
}

return read;
}

```


Apêndice B - Código-Fonte do Método de Localização

Script no Matlab®

```
% Funcao sispos
% Autor: Antonio Braulio Neto
% A funcao retorna a posicao de um objeto.
% A entrada t: um vetor 4x3 que contém, em cada linha, a posicao x, y e z do sensor correspondente.
% A entrada d: é um vetor 4x1 que contem as distancias de cada sensor ao objeto.

function [x]= sispos(t,d)

% estimativa inicial
x=[0;0;0];

erro=[((x(1)-t(1,1))^2+(x(2)-t(1,2))^2+(x(3)-t(1,3))^2-d(1)^2);
      ((x(1)-t(2,1))^2+(x(2)-t(2,2))^2+(x(3)-t(2,3))^2-d(2)^2);
      ((x(1)-t(3,1))^2+(x(2)-t(3,2))^2+(x(3)-t(3,3))^2-d(3)^2);
      ((x(1)-t(4,1))^2+(x(2)-t(4,2))^2+(x(3)-t(4,3))^2-d(4)^2)];

erro2=erro(1)^2+erro(2)^2+erro(3)^2+erro(4)^2;

%f=gradiente de erro^2
F=[erro(1)*(x(1)-t(1,1))+erro(2)*(x(1)-t(2,1))+erro(3)*(x(1)-t(3,1))+erro(4)*(x(1)-t(4,1));
   erro(1)*(x(2)-t(1,2))+erro(2)*(x(2)-t(2,2))+erro(3)*(x(2)-t(3,2))+erro(4)*(x(2)-t(4,2));
   erro(1)*(x(3)-t(1,3))+erro(2)*(x(3)-t(2,3))+erro(3)*(x(3)-t(3,3))+erro(4)*(x(3)-t(4,3))];

jacF=[2*((x(1)-t(1,1))^2+(x(1)-t(2,1))^2+(x(1)-t(3,1))^2+(x(1)-t(4,1))^2+erro(1)+erro(2)+erro(3)+erro(4) , 2*((x(2)-t(1,2))*(x(1)-t(1,1))+(x(2)-t(2,2))*(x(1)-t(2,1))+(x(2)-t(3,2))*(x(1)-t(3,1))+(x(2)-t(4,2))*(x(1)-t(4,1))) , 2*((x(3)-t(1,3))*(x(1)-t(1,1))+(x(3)-t(2,3))*(x(1)-t(2,1))+(x(3)-t(3,3))*(x(1)-t(3,1))+(x(3)-t(4,3))*(x(1)-t(4,1)))];
      2*((x(2)-t(1,2))*(x(1)-t(1,1))+(x(2)-t(2,2))*(x(1)-t(2,1))+(x(2)-t(3,2))*(x(1)-t(3,1))+(x(2)-t(4,2))*(x(1)-t(4,1))) , 2*((x(2)-t(1,2))^2+(x(2)-t(2,2))^2+(x(2)-t(3,2))^2+(x(2)-t(4,2))^2+erro(1)+erro(2)+erro(3)+erro(4) , 2*((x(3)-t(1,3))*(x(2)-t(1,2))+(x(3)-t(2,3))*(x(2)-t(2,2))+(x(3)-t(3,3))*(x(2)-t(3,2))+(x(3)-t(4,3))*(x(2)-t(4,2))));
```

```

2*((x(3)-t(1,3))*(x(1)-t(1,1))+(x(3)-t(2,3))*(x(1)-t(2,1))+(x(3)-t(3,3))*(x(1)-t(3,1))+(x(3)-
t(4,3))*(x(1)-t(4,1))) , 2*((x(3)-t(1,3))*(x(2)-t(1,2))+(x(3)-t(2,3))*(x(2)-t(2,2))+(x(3)-
t(3,3))*(x(2)-t(3,2))+(x(3)-t(4,3))*(x(2)-t(4,2))) , 2*((x(3)-t(1,3))^2+(x(3)-t(2,3))^2+(x(3)-
t(3,3))^2+(x(3)-t(4,3))^2)+erro(1)+erro(2)+erro(3)+erro(4)];

```

```

%Numero máximo de iterações = 10

```

```

for i=0:10;

```

```

x=x-inv(jacF)*F;

```

```

erro=[((x(1)-t(1,1))^2+(x(2)-t(1,2))^2+(x(3)-t(1,3))^2-d(1)^2);
((x(1)-t(2,1))^2+(x(2)-t(2,2))^2+(x(3)-t(2,3))^2-d(2)^2);
((x(1)-t(3,1))^2+(x(2)-t(3,2))^2+(x(3)-t(3,3))^2-d(3)^2);
((x(1)-t(4,1))^2+(x(2)-t(4,2))^2+(x(3)-t(4,3))^2-d(4)^2)];

```

```

F=[erro(1)*(x(1)-t(1,1))+erro(2)*(x(1)-t(2,1))+erro(3)*(x(1)-t(3,1))+erro(4)*(x(1)-t(4,1));
erro(1)*(x(2)-t(1,2))+erro(2)*(x(2)-t(2,2))+erro(3)*(x(2)-t(3,2))+erro(4)*(x(2)-t(4,2));
erro(1)*(x(3)-t(1,3))+erro(2)*(x(3)-t(2,3))+erro(3)*(x(3)-t(3,3))+erro(4)*(x(3)-t(4,3))];

```

```

jacF=[2*((x(1)-t(1,1))^2+(x(1)-t(2,1))^2+(x(1)-t(3,1))^2+(x(1)-
t(4,1))^2)+erro(1)+erro(2)+erro(3)+erro(4) , 2*((x(2)-t(1,2))*(x(1)-t(1,1))+(x(2)-t(2,2))*(x(1)-
t(2,1))+(x(2)-t(3,2))*(x(1)-t(3,1))+(x(2)-t(4,2))*(x(1)-t(4,1))) , 2*((x(3)-t(1,3))*(x(1)-
t(1,1))+(x(3)-t(2,3))*(x(1)-t(2,1))+(x(3)-t(3,3))*(x(1)-t(3,1))+(x(3)-t(4,3))*(x(1)-t(4,1)));

```

```

2*((x(2)-t(1,2))*(x(1)-t(1,1))+(x(2)-t(2,2))*(x(1)-t(2,1))+(x(2)-t(3,2))*(x(1)-t(3,1))+(x(2)-
t(4,2))*(x(1)-t(4,1))) , 2*((x(2)-t(1,2))^2+(x(2)-t(2,2))^2+(x(2)-t(3,2))^2+(x(2)-
t(4,2))^2)+erro(1)+erro(2)+erro(3)+erro(4) , 2*((x(3)-t(1,3))*(x(2)-t(1,2))+(x(3)-t(2,3))*(x(2)-
t(2,2))+(x(3)-t(3,3))*(x(2)-t(3,2))+(x(3)-t(4,3))*(x(2)-t(4,2)));

```

```

2*((x(3)-t(1,3))*(x(1)-t(1,1))+(x(3)-t(2,3))*(x(1)-t(2,1))+(x(3)-t(3,3))*(x(1)-t(3,1))+(x(3)-
t(4,3))*(x(1)-t(4,1))) , 2*((x(3)-t(1,3))*(x(2)-t(1,2))+(x(3)-t(2,3))*(x(2)-t(2,2))+(x(3)-
t(3,3))*(x(2)-t(3,2))+(x(3)-t(4,3))*(x(2)-t(4,2))) , 2*((x(3)-t(1,3))^2+(x(3)-t(2,3))^2+(x(3)-
t(3,3))^2+(x(3)-t(4,3))^2)+erro(1)+erro(2)+erro(3)+erro(4)];

```

```

end

```

Apêndice C - Código-Fonte do Software de Interface com o Usuário

```

Private Sub Form_Load()
' Porta Serial - Conexão com o microcontrolador Atmel Recebimento de
' informações do sensor de temperatura e tempo de resposta.
MSComm1.CommPort = 4
' 9600 baud, no parity, 8 data, and 1 stop bit.
MSComm1.Settings = "9600,N,8,1"
MSComm1.InputLen = 0
MSComm1.PortOpen = True

'Relatórios de entrada e saída.
Dim filename As String
filenum = FreeFile
filename = "/" & Format$(Now, "mm-dd-yyyy") & ".txt"

Open filename For Append As filenum
Write #filenum, "Dia" & vbTab & vbTab & "Hora" & vbTab & vbTab & "Temperatura" &
vbTab & vbTab & vbTab & "Posição"
Write #filenum, "---" & vbTab & vbTab & "----" & vbTab & vbTab & "-----" & vbTab
& vbTab & vbTab & "-----"
Close filenum
End Sub

Private Sub Timer1_Timer()
Dim valores(10) As Integer
Dim parcela As Integer
Dim i As Integer
Dim j As Integer
Dim counter As Integer

' A palavra contém DeltaT1;DeltaT2;DeltaT3;DeltaT4;Temperatura;$

```

```

Dim receive As String
Dim filename As String
filenum = FreeFile
filename = "/" & Format$(Now, "mm-dd-yyyy") & ".txt"
Instring = 0
j = 1

If MSComm1.InBufferCount > 10 Then
    receive = MSComm1.Input
    MSComm1.InBufferCount = 0
    If Mid$(receive, Len(receive), 1) = "$" And Len(receive) > 15 Then
        Instring = receive
        Enter.Text = Instring
    Else
        Instring = 0
    End If

    Do While j < Len(receive) - 1
        If Mid$(receive, j, 1) = "$" Then
            Instring = 0
        End If
        j = j + 1
    Loop
    counter = 0

    j = 1

    Do While j < Len(receive)
        If Mid$(receive, j, 1) = ";" Then
            counter = counter + 1
        End If
        j = j + 1
    Loop

    If counter <> 5 Then

```

```
Instring = 0
End If
```

```
End If
```

```
If Len(Instring) > 10 Then
```

```
    i = 1
    parcela = 1
    Do While Mid$(Instring, i, 1) <> "$" And i < Len(Instring)
        If Mid$(Instring, i, 1) = ";" Then
            valores(parcela) = i
            parcela = parcela + 1
        End If
        i = i + 1
    Loop
```

```
sensor1.Caption = Mid$(Instring, 1, valores(1) - 1)
sensor2.Caption = Mid$(Instring, valores(1) + 1, valores(2) - valores(1) - 1)
sensor3.Caption = Mid$(Instring, valores(2) + 1, valores(3) - valores(2) - 1)
sensor4.Caption = Mid$(Instring, valores(3) + 1, valores(4) - valores(3) - 1)
temperatura.Caption = Mid$(Instring, valores(4) + 1, valores(5) - valores(4) - 1)
```

```
sensor_one = Mid$(Instring, 1, valores(1) - 1)
sensor_two = Mid$(Instring, valores(1) + 1, valores(2) - valores(1) - 1)
sensor_three = Mid$(Instring, valores(2) + 1, valores(3) - valores(2) - 1)
sensor_four = Mid$(Instring, valores(3) + 1, valores(4) - valores(3) - 1)
temperature = Mid$(Instring, valores(4) + 1, valores(5) - valores(4) - 1)
```

```
som.Caption = 331.736 + 0.586437 * temperature
sound = 331.736 + 0.586437 * temperature
```

```
' Programação defensiva para cálculo de distâncias.
```

```
' Os valores de delta t para sensor_one deve estar entre as medidas 100000 e 200.
```

```
If sensor_one < 10000 And sensor_one > 200 Then
```

```

    distancia_one = sound * sensor_one / 1000000
Else
    distancia_one = 0
End If
If sensor_two < 10000 And sensor_two > 200 Then
    distancia_two = sound * sensor_two / 1000000
Else
    distancia_two = 0
End If
If sensor_three < 10000 And sensor_three > 200 Then
    distancia_three = sound * sensor_three / 1000000
Else
    distancia_three = 0
End If
If sensor_four < 10000 And sensor_four > 200 Then
    distancia_four = sound * sensor_four / 1000000
Else
    distancia_four = 0
End If
distancia_1.Caption = Mid$(distancia_one, 1, 7)
distancia_2.Caption = Mid$(distancia_two, 1, 7)
distancia_3.Caption = Mid$(distancia_three, 1, 7)
distancia_4.Caption = Mid$(distancia_four, 1, 7)

Open filename For Append As filenum
Write #filenum, Date & vbTab & Time & vbTab & vbTab & temperature + "°C" & vbTab
& vbTab & vbTab & Mid$(distancia_one, 1, 7) + ";" + Mid$(distancia_two, 1, 7) + ";" +
Mid$(distancia_three, 1, 7) + ";" + Mid$(distancia_four, 1, 7)
Close filenum

Dim x_flag As Boolean
Dim y_flag As Boolean

x_flag = False
y_flag = False

' Buscar a Coordenada X

```

```

If distancia_one <> 0 And distancia_two <> 0 And x_flag = False Then
  If distancia_one <= distancia_two Then
    coordenada_x = (distancia_one / distancia_two) / 2
  Else
    coordenada_x = ((distancia_two / distancia_one) / 2) + 0.5
  End If
  x_flag = True
End If

If distancia_four <> 0 And distancia_three <> 0 And x_flag = False Then
  If distancia_four <= distancia_three Then
    coordenada_x = (distancia_four / distancia_three) / 2
  Else
    coordenada_x = ((distancia_three / distancia_four) / 2) + 0.5
  End If
  x_flag = True
End If

' Buscar a Coordenada Y

If distancia_one <> 0 And distancia_four <> 0 And y_flag = False Then
  If distancia_one <= distancia_four Then
    coordenada_y = (distancia_one / distancia_four) / 2
  Else
    coordenada_y = ((distancia_four / distancia_one) / 2) + 0.5
  End If
  y_flag = True
End If

If distancia_two <> 0 And distancia_three <> 0 And y_flag = False Then
  If distancia_two <= distancia_three Then
    coordenada_y = (distancia_two / distancia_three) / 2
  Else
    coordenada_y = ((distancia_three / distancia_two) / 2) + 0.5
  End If
  y_flag = True
End If

```

```
' Determina a localização do objeto móvel no eixo x e y.  
If x_flag = True Then  
    valuex.Caption = coordenada_x  
    ponto.X1 = (coordenada_x) * 2640 + 360  
    ponto.X2 = (coordenada_x) * 2640 + 360  
End If  
  
If y_flag = True Then  
    valuey.Caption = coordenada_y  
    ponto.Y1 = 3240 - (coordenada_y) * 2640  
    ponto.Y2 = 3240 - (coordenada_y) * 2640  
End If  
End If  
End Sub
```


Apêndice D - Fotos do Protótipo e dos Testes



Figura D-1: Transdutores MA40S5 (Murata).



Figura D-2: Testes de medição de distâncias – circuito e interface com usuário.



Figura D-3: Testes de medição de distâncias – transdutores.



Figura D-4: Testes de medição de distâncias – transdutor receptor.



Figura D-5: Testes de medição de distâncias – transdutor emissor.



Figura D-6: Primeira alternativa proposta.

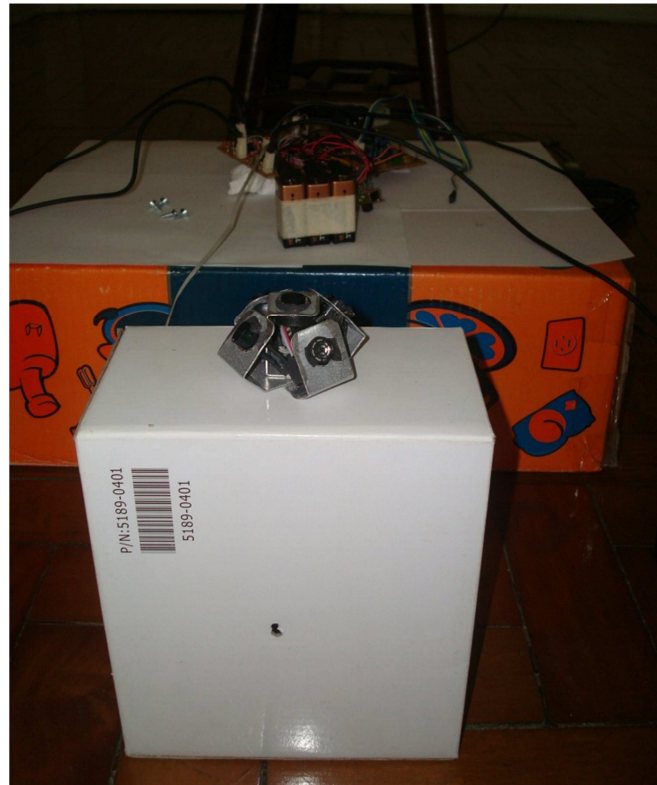


Figura D-7: Testes com o novo arranjo de emissores.

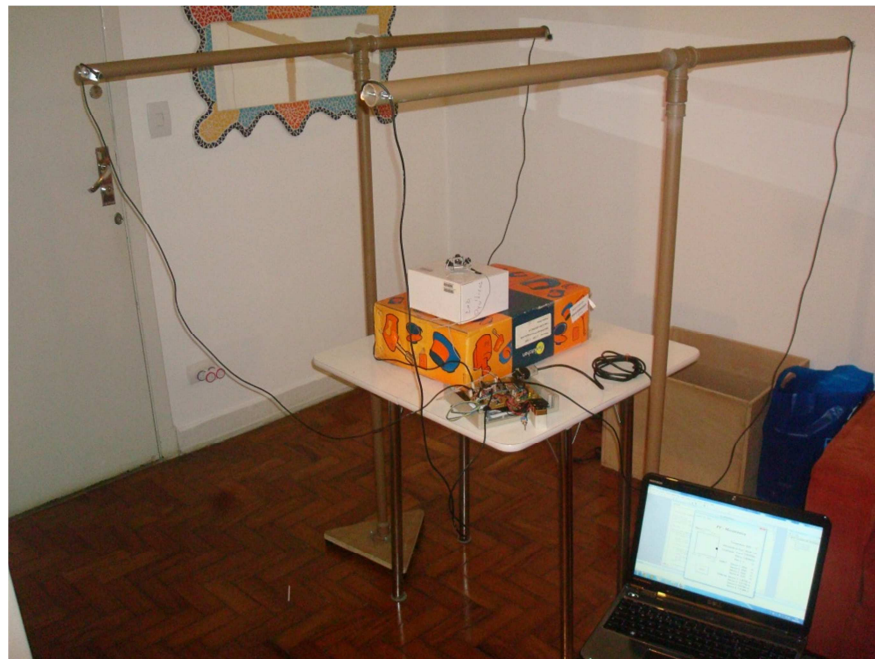


Figura D-8: Terceira alternativa proposta – solução final.



Figura D-9: Terceira alternativa proposta – detalhe da fixação dos transdutores.



Figura D-10: Terceira alternativa proposta – emissor e circuito de controle.

Apêndice E - Resultado – tabela de medições

	Temperatura		Distâncias [m]			
	[°C]	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4	
1	20	1,00703	0,90846	0,86381	1,07264	
2	20	1,00703	0,90846	0,87583	1,07264	
3	20	1,00703	0,91155	0,87583	1,07538	
4	20	1,00978	0,90846	0,86690	1,07538	
5	20	1,00703	0,91155	0,87583	1,07538	
6	20	1,00978	0,90846	0,87583	1,07538	
7	20	1,00978	0,90846	0,87583	1,07538	
8	20	1,00978	0,90846	0,87583	1,07538	
9	20	1,00978	0,90846	0,87583	1,07538	
10	20	1,00978	0,90846	0,87583	1,07538	
11	20	1,00978	0,90846	0,87583	1,07538	
12	20	1,00703	0,90846	0,87583	1,07264	
13	20	1,00703	0,91155	0,87583	1,07264	
14	20	1,00978	0,90846	0,87583	1,07538	
15	20	1,00703	0,90846	0,87274	1,07538	
16	20	1,00703	0,90846	0,87274	1,07538	
17	20	1,00703	0,90846	0,87274	1,07538	
18	20	1,00703	0,90846	0,87274	1,07538	
19	20	1,00703	0,90846	0,87583	1,07264	
20	20	1,00703	0,91155	0,86690	1,07264	
21	20	1,00703	0,91739	0,87583	1,07538	
22	20	1,00703	0,90846	0,87583	1,07264	
23	20	1,00703	0,91155	0,87274	1,07538	
24	20	1,00978	0,90846	0,87583	1,07264	
25	20	1,00703	0,90846	0,87583	1,07264	
26	20	1,00703	0,91155	0,87583	1,07538	
27	20	1,00978	0,90846	0,87583	1,07538	
28	20	1,00703	0,90846	0,87583	1,07264	
29	20	1,00703	0,91155	0,87583	1,07538	
30	20	1,00978	0,90846	0,87583	1,07538	
31	20	1,00703	0,91739	0,87583	1,07538	
32	20	1,00978	0,90846	0,87583	1,07538	
33	20	1,00703	0,90846	0,87583	1,07264	
34	20	1,00703	0,91155	0,87583	1,07264	
35	20	1,00703	0,91155	0,87583	1,07538	
36	20	1,00978	0,90846	0,87583	1,07264	
37	20	1,00703	0,90846	0,87583	1,07264	

	Temperatura		Distâncias [m]		
	[°C]	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4
38	20	1,00703	0,91155	0,87583	1,07264
39	20	1,00978	0,90846	0,87583	1,07264
40	20	1,00703	0,90846	0,87583	1,07264
41	20	1,00703	0,91155	0,87583	1,07264
42	20	1,00978	0,90846	0,87583	1,07264
43	20	1,00703	0,91739	0,87583	1,07538
44	20	1,00703	0,90846	0,87583	1,07264
45	20	1,00703	0,91155	0,87583	1,07264
46	20	1,00978	0,90846	0,87583	1,07264
47	20	1,00703	0,90846	0,87583	1,07264
48	20	1,00703	0,91155	0,87274	1,07538
49	20	1,00703	0,91155	0,87583	1,07264
50	20	1,00978	0,90846	0,87583	1,07264
51	20	1,00703	0,90846	0,87583	1,07264
52	20	1,00703	0,91155	0,87583	1,07264
53	20	1,00978	0,90846	0,87583	1,07264
54	20	1,00703	0,90846	0,87583	1,07264
55	20	1,00703	0,91155	0,87274	1,07538
56	20	1,00978	0,90846	0,87583	1,07264
57	20	1,00703	0,90846	0,87583	1,07538
58	20	1,00703	0,91155	0,87274	1,07538
59	20	1,00978	0,90846	0,87583	1,07264
60	20	1,00703	0,90846	0,87583	1,07264
61	20	1,00703	0,91155	0,87583	1,07264
62	20	1,00703	0,91155	0,87583	1,07264
63	20	1,00978	0,90846	0,87583	1,07264
64	20	1,00703	0,90846	0,87274	1,07538
65	20	1,00703	0,90846	0,87583	1,07264
66	20	1,00703	0,90846	0,87583	1,07264
67	20	1,00703	0,91739	0,87583	1,07264
68	20	1,00703	0,91155	0,87583	1,07538
69	20	1,00703	0,90846	0,87583	1,07264
70	20	1,00703	0,90846	0,87583	1,07264
71	20	1,00703	0,91739	0,87583	1,07538
72	20	1,00703	0,92048	0,87583	1,07264
73	20	1,00703	0,91155	0,87583	1,07538
74	20	1,00703	0,91155	0,87583	1,07538
75	20	1,00703	0,91155	0,87583	1,07538
76	20	1,00703	0,91155	0,87583	1,07538
77	20	1,00703	0,91155	0,87583	1,07264
78	20	1,00703	0,90846	0,87274	1,07538
79	20	1,00703	0,91155	0,87583	1,07538
80	20	1,00703	0,91155	0,87583	1,07538

Temperatura		Distâncias [m]			
	[°C]	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4
81	20	1,00978	0,90846	0,87583	1,07538
82	20	1,00703	0,91155	0,87583	1,07538
83	20	1,00703	0,91155	0,87583	1,07264
84	20	1,00978	0,90846	0,87583	1,07538
85	20	1,00703	0,91155	0,87583	1,07538
86	20	1,00703	0,91155	0,87583	1,07264
87	20	1,00978	0,90846	0,87583	1,07538
88	20	1,00703	0,90846	0,87274	1,07538
89	20	1,00703	0,90846	0,87274	1,07538
90	20	1,00703	0,90846	0,87274	1,07538
91	20	1,00703	0,90846	0,87274	1,07538
92	20	1,00703	0,90846	0,87274	1,07538
93	20	1,00703	0,90846	0,87274	1,07538
94	20	1,00703	0,90846	0,87274	1,07538
95	20	1,00703	0,90846	0,87274	1,07538
96	20	1,00703	0,90846	0,87274	1,07538
97	20	1,00703	0,90846	0,87274	1,07538
98	20	1,00703	0,90846	0,87274	1,07538
99	20	1,00703	0,90846	0,87274	1,07538
100	20	1,00703	0,90846	0,87274	1,07538
Mín.	20	1,0070	0,9085	0,8638	1,0726
Máx.	20	1,0098	0,9205	0,8758	1,0754
Média	20	1,0077	0,9100	0,8748	1,0742
Desvio	0	0,0012	0,0025	0,0021	0,0014
Valor medido		1,00	0,87	0,86	1,09
Erro (%)		0,77%	4,60%	1,72%	1,45%

Tabela E-1: Resultado dos testes de localização.