

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA**



**SISTEMA AUTOMATIZADO DE INSPEÇÃO DE
SUPERFÍCIES METÁLICAS UTILIZANDO A TÉCNICA
ULTRA-SÔNICA TOFD.**

**DIOGO DONG KIM
PEDRO PAULO CARDOZO DE MELLO Jr.**

**São Paulo
2006**

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA**

*Nota final
7,2 (sete e dois)*

WDM

**SISTEMA AUTOMATIZADO DE INSPEÇÃO DE
SUPERFÍCIES METÁLICAS UTILIZANDO A TÉCNICA
ULTRA-SÔNICA TOFD.**

**DIOGO DONG KIM
PEDRO PAULO CARDOZO DE MELLO Jr.**

Trabalho de formatura apresentado á Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Engenheiro Mecatrônico.

**São Paulo
2006**

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITECNICA

1960

SISTEMA AUTOMATIZADO DE
SUPERFICIES METÁLICAS E
LITOGRAFIA

TE 06
K56s

DEDALUS - Acervo - EPMN



31600012507

1600873

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITECNICA

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer a todas as pessoas que colaboraram na execução deste projeto de formatura. Gostaríamos de mencionar as participações dos técnicos Gilberto e Adilson, que ajudaram na execução da construção mecânica do projeto e do professor Nilson, que auxiliou na construção da eletrônica do sistema. Somos também muito gratos a todos os professores e colegas que tivemos o privilégio de conviver durante nossos anos de graduação, onde cada um contribuiu com um punhado dos homens que somos hoje, tanto no âmbito profissional como no pessoal.

Finalmente gostaríamos de deixar nossos sinceros agradecimentos ao professor Flávio Buiochi, pois sem seu apoio e orientação este projeto não teria sido possível. O ato de compartilhar toda a sua experiência conosco sem dúvida alguma será um dos maiores aprendizados resultantes deste projeto e levaremos isto conosco pelo resto de nossas vidas profissionais.

RESUMO

Kim, D.D.; Mello Jr., P.P.C. “*Sistema automatizado de inspeção de superfícies metálicas utilizando a técnica ultra-sônica TOFD.*” 2006. Trabalho de formatura – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo 2006.

Este trabalho trata do desenvolvimento de um sistema automatizado de inspeção de soldas em estruturas metálicas por ultra-som, utilizando a técnica *Time of Flight Diffraction* (TOFD). Serão montados dois transdutores de ultra-som (um emissor e outro receptor) em um dispositivo mecânico com rodas magnéticas de movimentação automática em uma direção fixa. O dispositivo mecânico será acionado por um motor de passo. Serão utilizadas uma placa para a excitação do transdutor de ultra-som e outra para a conversão analógica/digital dos sinais ultra-sônicos recebidos, bem como, um *driver* para acionar o motor de passo. Será utilizado um microcomputador para controlar todo o sistema mecânico e eletrônico. O sistema permitirá ao usuário determinar os parâmetros de inspeção desejados: posição inicial e final, velocidade de varredura e discretização da inspeção. Um bloco metálico de calibração com defeitos padrões, representados por furos e rasgos, será projetado e utilizado para os testes experimentais do sistema na detecção de descontinuidades.

Palavras chave: Ultra-som, TOFD, ensaios não destrutivo, END, sistema automatizado.

ABSTRACT

Kim, D.D.; Mello Jr., P.P.C. *“Sistema automatizado de inspeção de superfícies metálicas utilizando a técnica ultra-sônica TOFD.”* 2006. Trabalho de formatura – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo 2006.

This work deals with the development of an automatized system of weld inspection in metallic structures by ultrasound, using Time of Flight Diffraction technique (TOFD). Two ultrasound probes (a sender and another one receiver) in a mechanical device with magnetic wheels and automatic movement in a fixed direction will be mounted. The mechanical device will be set in motion by a step engine. A excitement ultrasound transducer board and an analogical/digital one for the received ultrasound signal will be used, as well as, a driver to set in motion of the step engine. A computer will be used to control all the mechanical and electronic system. The system will let the user to determine the desired parameters of inspection: initial and final position, speed of sweepings and discretization of the inspection. A metallic block of calibration with standard defects, represented for punctures and rips, will be projected and used for the experimental tests of the system in the detection of discontinuities.

Keywords: Ultrasound, TOFD, non destructive testings, NDT, automatized system.

SUMÁRIO

1	Introdução	8
1.1	A Necessidade da Medida Precisa do Tamanho da Falha	9
2	Conceitos básicos	11
2.1	Velocidade de Propagação e Classificação da Onda:	11
2.2	Abertura (ou difração) do Feixe Ultra-Sônico.	12
2.3	Impedância Acústica.....	13
2.4	Reflexão e Refração:	14
2.5	Atenuação:	15
2.6	Transdutor:	16
3	técnica TOFD:	17
3.1	Historia da técnica	17
3.2	Testes Convencionais de Ultra-Som	17
3.3	Problemas com a Técnica Pulso-eco	18
3.4	O Processo de Refração	18
4	PROTÓTIPO DO SISTEMA DE INSPEÇÃO:.....	22
4.1	Projeto Mecânico	23
4.1.1	Dispositivo de movimentação.....	23
4.1.2	Acoplamento Magnético.....	26
4.1.3	Escolha do Motor de Passo	27
4.1.4	Estrutura.....	29
4.1.5	Sistema de fixação dos transdutores	29
4.2	Projeto Elétrico e Eletrônico	31
4.2.1	Fonte de alimentação.....	31
4.2.2	Dispositivo de controle	31
4.2.3	Controlador	32
4.2.4	Driver do motor de passo.....	34
4.2.5	Dispositivo de aquisição.....	35
4.3	Programação	36
5	RESULTADOS OBTIDOS	37
5.1	Arranjo Experimental	37
5.2	Ensaio Experimental.....	39

6 CONCLUSÃO	45
REFERÊNCIAS.....	46

1 INTRODUÇÃO

Toda vez que um aplicativo doméstico é ligado, o tanque de um automóvel é preenchido com combustível ou uma viagem, seja ela por mar, terra ou céu, é feita, existirá direta ou indiretamente algum equipamento ou estrutura trabalhando em condição de carregamento. Como exemplos citam-se a maioria da energia elétrica gerada atualmente, que para tal requer caldeiras que funcionam a altíssimas pressões e as tubulações usadas para transportar o gás natural da Bolívia até o Brasil. Grande parte dos componentes dos meios modernos de transporte são submetidos a uma alta ou rápida variação de tensão. Em todas essas aplicações a falha gerada por um componente defeituoso pode gerar conseqüências humanas ou econômicas catastróficas. Portanto, métodos para prever e evitar que isto aconteça trazem grandes benefícios.

Em qualquer projeto de engenharia, os componentes são projetados de modo a obter a melhor relação custo-benefício para alcançar o objetivo proposto, onde cada componente é perfeitamente adequado para resistir às forças e tensões que lhe serão submetidas. Quando uma falha ocorre, a causa normalmente é um defeito em um componente específico, normalmente uma micro-fenda, mas suficientemente grande para causar uma grande redução em sua resistência. Tais defeitos podem acontecer devido a falhas na sua fabricação ou efeito de um ambiente de trabalho corrosivo, sempre ampliados pela fadiga. Para assegurar que estes não ocorrerão após a fabricação ou para detectá-los antes de seu colapso, foram desenvolvidos uma série de testes não destrutivos. Entre eles, testes envolvendo ultra-som são os que possuem a maior aplicabilidade, sendo capazes de detectar e medir falhas (fendas) em uma grande variedade de locais e formatos, bem como em muitos materiais usados na engenharia e até em materiais com alta espessura (maiores que 300mm em ferro). Neste trabalho será estudada uma técnica ultra-sônica em particular.

Técnicas convencionais de inspeção por ultra-som consistem em analisar a amplitude e o comprimento do sinal retornado do defeito para o equipamento de aquisição para a partir destes dados caracterizar a falha. O processo que influencia na amplitude é normalmente a reflexão, onde a falha atua como se fosse um espelho para o ultra-som. Para um dado arranjo de transdutores ultra-sônicos no

componente a ser inspecionado, este processo de reflexão pode ocorrer apenas para um número limitado de orientações da falha. Na falta da reflexão, os sinais retornados serão a difusão dispersa e a refração, provenientes das superfícies e da extremidade da falha, respectivamente. Os sinais difratados são de particular interesse, já que, como são associados às extremidades das falhas, podem ser usados para determinar o tamanho da mesma com relativa precisão, avaliando assim a integridade do componente. A técnica estudada, Time of Flight Diffraction (TOFD) é baseada no aproveitamento destes sinais vindos das bordas (extremidades) da falha.

1.1 A Necessidade da Medida Precisa do Tamanho da Falha

Estruturas podem falhar catastróficamente se elas tiverem defeitos de um certo tamanho crítico para a carga aplicada. A máxima resistência teórica de um material (baseada nas ligações de seus elementos químicos) nunca é alcançada em elementos grandes, mas apenas em materiais fibrosos muito pequenos [Gordon, 1976]. Na prática, a resistência a fraturas é determinada por falhas na superfície ou dentro do material. Quando um material é tensionado, energia elástica é armazenada. Se o material contiver uma falha que aumente de tamanho, para um dado carregamento, então as paredes da falha irão se distanciar uma da outra. O material por trás dessas paredes relaxa e a energia armazenada lá é então liberada. Entretanto, este processo cria uma nova parede para a falha, processo este que requer uma certa quantidade de energia. Fazendo o balanço de energia, uma relação para o tamanho teórico da falha é dada por [Gordon, 1976]:

$$a_c = \frac{2WE}{\pi\sigma^2}$$

Onde a_c é dado em metros, W é o trabalho da fratura do sólido em J/m^2 , E é o módulo de elasticidade e σ é a tensão aplicada (em N/m^2). Uma falha crítica acontece quando sua orientação é perpendicular a principal força aplicada e este é seu principal parâmetro. A correta e precisa medição deste parâmetro é, portanto de grande importância para assegurar a integridade dos componentes que formam a

estrutura. E a técnica Time of Flight Diffraction descrita neste trabalho é um destes métodos. Até pouco tempo, as técnicas disponíveis permitiam localizar as falhas, mas não obter medidas precisas de seu tamanho. E, enquanto a qualidade dos componentes pode ser assegurada por rigorosos métodos de inspeção, isto freqüentemente resulta em reparos dispendiosos economicamente ou substituições onde hipóteses pessimistas são feitas a respeito da amplitude do defeito. Por outro lado, se inspeções menos rigorosas são feitas, os defeitos podem ser subestimados. Esta situação levou a um considerável desenvolvimento de técnicas de inspeção não destrutivas, particularmente no campo do ultra-som. Hoje há mais técnicas disponíveis, entre elas a TOFD, que possuem grande precisão (em muitos casos melhores que 1mm) e grande mobilidade para inspecionar uma grande variedade de materiais.

2 CONCEITOS BÁSICOS

2.1 Velocidade de Propagação e Classificação da Onda:

Ondas ultra-sônicas são vibrações mecânicas com as mesmas propriedades das ondas sonoras, porém essas ondas possuem frequências altas o bastante para não serem detectadas pelo ouvido humano, isto é, maior do que 20 kHz. Para inspeção de soldas e descontinuidades em metais, as ondas ultra-sônicas geralmente têm frequências entre 500kHz e 10MHz, mas a maioria delas são em torno de 1MHz a 5MHz.

É importante notar que ondas ultra-sônicas não são uma radiação eletromagnética passando pelo material inspecionado, mas sim o próprio material vibrando, por essa razão a velocidade da onda é diferente em diferentes materiais (tabela 1). Essa velocidade é dada pela seguinte lei:

$$V = \lambda f$$

Onde:

V = Velocidade de propagação da onda

λ = Comprimento de onda

f = Frequência

Existem muitos tipos de ondas ultra-sônicas, as formas mais importantes para o estudo de ensaios não destrutivos são as ondas longitudinais e transversais.

As ondas são classificadas longitudinais quando a perturbação é paralela a direção da propagação da onda e essas ondas podem ser transmitidas em sólidos e líquidos.

Já nas ondas transversais a perturbação é perpendicular a direção de propagação da onda, essas ondas não podem ser transmitidas em líquidos e tem em torno da metade da velocidade das ondas longitudinais no mesmo material, como exemplificado na tabela 1 abaixo.

Tabela 1 - Velocidade das ondas ultra-sônicas em diferentes materiais (m/s)

Material	longitudinal	Transversal	Plana (Rayleigh)
Aço	5900	3100	3000
Alumínio	6200	3100	2800
Água (20°C)	1500	-	-
Óleo	1200	-	-

2.2 Abertura (ou difração) do Feixe Ultra-Sônico.

As ondas ultra-sônicas, devido ao pequeno tamanho, se propagam essencialmente em linha reta, apesar disso, sempre há uma difração (espalhamento) do feixe ultra-sônico. O ângulo desta abertura, θ , é dado por:

$$\text{sen}\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{1,22\lambda}{D}$$

Onde:

D = diâmetro do material piezelétrico do transdutor

λ = comprimento da onda no material

Essa difração pode ser observado na figura 1.

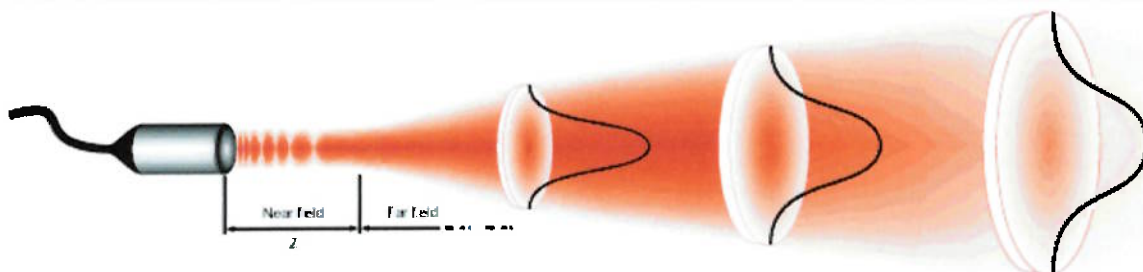


Figura 1- Espalhamento do feixe no campo distante.

Assim, quanto maior a frequência do transdutor, menor será a abertura da onda ultra-sônica.

Um feixe ultra-sônico de um transdutor é geralmente descrito usando os termos “campo próximo” e “campo distante”. No campo próximo o feixe tem os lados aproximadamente paralelos e seu tamanho, L , é dado por:

$$L = \frac{D^2}{4\lambda}$$

Onde:

D = diâmetro do material piezelétrico do transdutor

λ = comprimento da onda no material

No campo próximo, notam-se variações de máximas e mínimas intensidades ultra-sônicas, que podem causar sérios problemas na estimativa do tamanho da falha, caso a mesma se encontre nesta região do feixe. No campo distante, o feixe ultra-sônico diverge e sua intensidade decai inversamente proporcional à distância. A figura 2 exemplifica essas variações de intensidades.

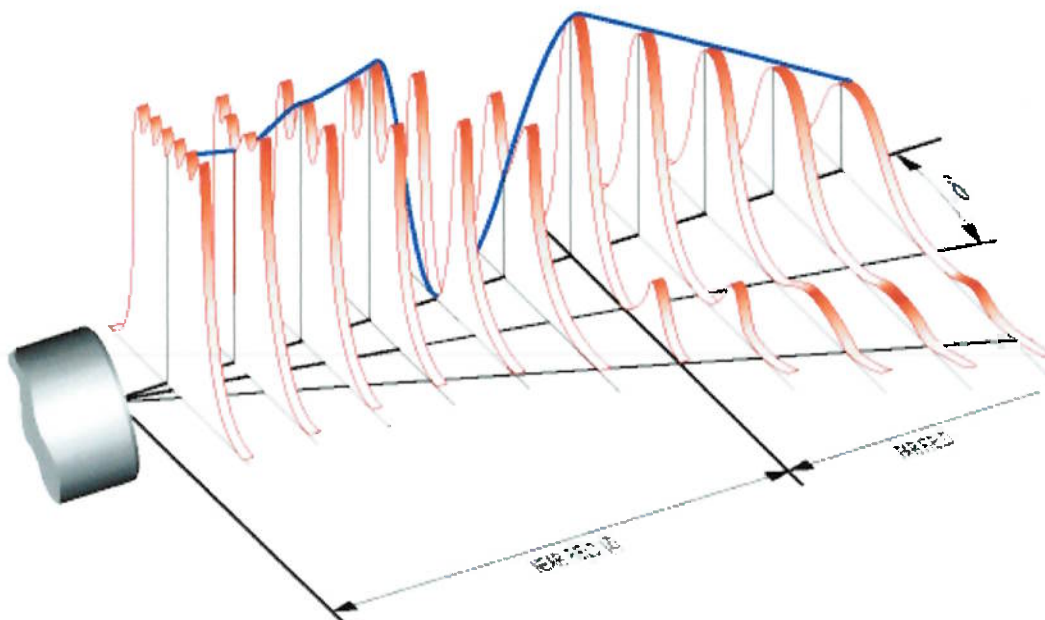


Figura 2 – Variações de intensidade da onda acústica.

2.3 Impedância Acústica

A impedância acústica de um meio está relacionada com a resistência ou dificuldade que o meio impõe a passagem da onda acústica. E é definida por:

$$Z = \rho V$$

Onde:

ρ = densidade do material por onde a onda se propaga

V = velocidade de propagação da onda ultra-sônica no meio

Quando um feixe ultra-sônica atinge uma interface entre dois meios, sob certos ângulos, parte da energia é refletida e parte da energia é transmitida.

Se:

E_i é a energia incidente,

E_t a energia transmitida e

E_r a energia refletida,

$$E_t = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \cdot E_i$$

$$E_r = \left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2 \cdot E_i$$

Z_1 e Z_2 são as impedâncias acústicas dos dois materiais que formam a interface (sob ângulo de incidência normal).

Se os valores inseridos forem os da interface água/aço, percebe-se que aproximadamente 12% da energia incidente será transmitida e os outros 88% será refletido, enquanto que com o ar, menos de 1% é transmitido.

2.4 Reflexão e Refração:

Quando um feixe ultra-sônico atinge uma interface com um certo ângulo que não seja o normal, aparecerá tanto a onda refletida quanto a refratada. Relações simples descrevem os ângulos e as velocidades desses feixes, a equação geral é conhecida como lei de Snell (figura 3).

$$c_i \operatorname{sen} \theta_i = c_t \operatorname{sen} \theta_t$$

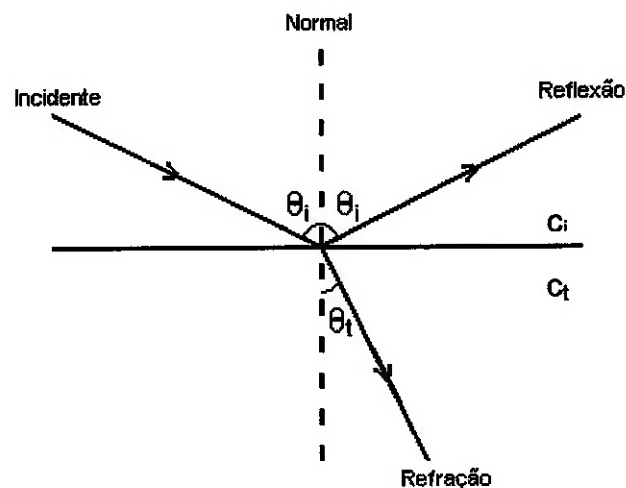


Figura 3 – Lei de Snell

Onde:

c_i = velocidade de propagação no meio de onde o feixe provem

$\operatorname{sen} \theta_i$ = ângulo do feixe em relação a normal no meio de onde provem

o raio

c_t = velocidade de propagação no meio de onde o feixe é transmitido

$\operatorname{sen} \theta_t$ = ângulo do feixe em relação a normal no meio pra onde o feixe

é transmitido

Dependendo do ângulo de incidência, pode não haver onda transmitida, o que chamamos de reflexão total, e ocorre quando o ângulo de incidência é acima do ângulo limite de refração.

2.5 Atenuação:

A atenuação pode ser definida como a diminuição da intensidade do feixe ultra-sônico ao atravessar o meio.

Quando uma onda se propaga por um material ela é atenuada por vários mecanismos, como dispersão, absorção da energia e reflexão. A atenuação depende basicamente da natureza da estrutura do material (tamanho de grão e orientação do mesmo) e da frequência da onda. A atenuação de ondas ultra-sônicas em muitos materiais de engenharia é pequena, portanto as ondas podem viajar alguns metros em aço ou alumínio, mas há dificuldades em aplicar esses testes ultra-sônicos em ligas de cobre ou soldas em aços austeníticos. Essa dificuldade ocorre devido à estrutura anisotrópicas dos grãos e ao tamanho dos grãos. Os feixes ultra-sônicos sofrem grande dispersão e podem se distorcer com o aparecimento do defeito no material inspecionado e gerar uma falsa leitura ou localização.

2.6 Transdutor:

Transdutores são elementos capazes de converter uma forma de energia em outra, no caso deste estudo os transdutores são formados por materiais piezelétricos que produzam e recebam o feixe ultra-sônico. Para isso o transdutor de emissão (o que produz o feixe ultra-sônico) recebe um sinal elétrico com uma certa frequência e gera uma vibração de mesma frequência, transformando assim energia elétrica em energética mecânica. Já o transdutor de leitura recebe o feixe ultra-sônico e gera o sinal elétrico de mesma frequência, ou seja, transforma energia mecânica em energia elétrica. Este sinal elétrico será tratado e através dele será possível gerar as imagens que são o resultado do teste.

3 TÉCNICA TOFD:

3.1 Historia da técnica

O desenvolvimento da técnica TOFD cresceu motivado pelas dificuldades de alcançar medidas precisas das falhas com outras técnicas tradicionais de ultra-som. Esta foi desenvolvida no começo dos anos setenta, como uma ferramenta portátil com um transdutor para transmissão e um transdutor para recepção [Silk et al, 1976]. Sua invenção se deu no National NDT Centre, Harwell, Reino Unido, pelo doutor Maurice Silk, e foi transformada nos anos oitenta de uma curiosidade de laboratório a um completo método de inspeção capaz de detectar e medir defeitos em componentes de um milímetro a tubos de duzentos e cinquenta milímetros de espessura.

3.2 Testes Convencionais de Ultra-Som

Testes convencionais de ultra-som usam a técnica pulso-eco. Um transdutor dispara um pulso ultra-sônico no metal a ser inspecionado e qualquer eco que voltar é recebido com o mesmo transdutor. Os ecos são normalmente visualizados em um osciloscópio modificado, que mostra a forma da onda retificada usando um tempo base que inicia quando o pulso é dado e é calibrado horizontalmente (é importante conhecer a velocidade de propagação da onda) em relação a distancia do metal. O sistema é calibrado verticalmente ajustando-se o ganho amplificado para que o sinal de uma característica padrão em um bloco de calibração apareça com um certo tamanho na tela. A amplitude de outros sinais pode ser obtida ajustando-se os ganhos calibrados ou os controles de atenuação para que estes dêem o mesmo tamanho na tela. Assim, estabelecido um nível padrão, sinais maiores que o nível são tratados como falhas e sinais menores são ignorados. O tamanho das falhas é estimado ou pela simples comparação da amplitude com as de um refletor de calibração, ou pela quantidade de movimento do transdutor necessário para causar uma queda na força do sinal (para grandes falhas). Esta é uma explicação muito sucinta, já que não é o objetivo deste trabalho. Este método pode envolver um complexo sistema de controle, aquisição e processamento computadorizado.

3.3 Problemas com a Técnica Pulso-eco

O problema principal desta técnica é que esta é baseada na hipótese de que os ecos vêm de falhas com paredes posicionadas com ângulos que possibilitem obter uma reflexão de volta ao transdutor. Claramente é raro defeitos serem exatamente normais à onda ultra-sônica, permitindo uma reflexão perfeita da onda. Por sorte, em casos práticos a refração causa uma energia de reflexão que se propaga em ângulos maiores. Entretanto, métodos de mensurar o tamanho das falhas pelo movimento do transdutor requerem um pré-julgamento de quando a onda alcançou a extremidade da falha. Para um resultado confiável desta técnica precisa-se do uso de transdutores enviando ondas em vários ângulos, dependendo da orientação dos defeitos procurados e uma análise muito cuidadosa dos ecos resultantes.

3.4 O Processo de Refração

A razão para que o tamanho do defeito possa ser medido em defeitos que não estão perfeitamente alinhados é que existem outros sinais além da reflexão. Basta lembrar que quando existe um obstáculo no caminho de um raio de luz, uma parte desta luz curva-se pelo efeito da refração. Os efeitos da refração da luz são dependentes do material do obstáculo e do comprimento da onda. O mesmo fenômeno ocorre com ondas elásticas, entretanto, como o comprimento de onda (no caso do ultra-som) é da ordem de poucos milímetros ou mais, este efeito é observado com mais frequência. Usuários mais experientes da técnica pulso-eco fazem uso dessas ondas para obter o tamanho preciso das falhas, mas eles têm que procurar por elas entre muitos e variáveis sinais de reflexão.

3.5 A Técnica Time-of-Flight Diffraction

A partir da observação do fato acima, viu-se que seria vantajoso desenvolver uma técnica que se utiliza diretamente as ondas difratadas, evitando as ondas refletidas. Esta é a base da técnica Time of Flight Diffraction.

Para otimizar a força do sinal difratado e evitar as ondas refletidas os transdutores são posicionados conforme a figura 4. Um sinal típico consiste de um primeiro pulso de uma onda viajando pela rota mais direta, chamada onda plana, seguida por zero ou mais pulsos de ondas difratadas vindo de defeitos e finalmente uma reflexão proveniente da parede de trás do corpo de provas (assumindo este ser uma placa). A onda lateral e o eco proveniente da parede de trás atuam como sinais de referência, delimitando o tempo onde sinais provenientes de defeitos podem ser esperados. Note que a extremidade superior e inferior dos defeitos devem dar sinais de praticamente a mesma amplitude, mas em fases opostas, portanto para qualquer sinal individual, um pode indicar, pela fase, se seu originador é o topo ou o fundo de um defeito.

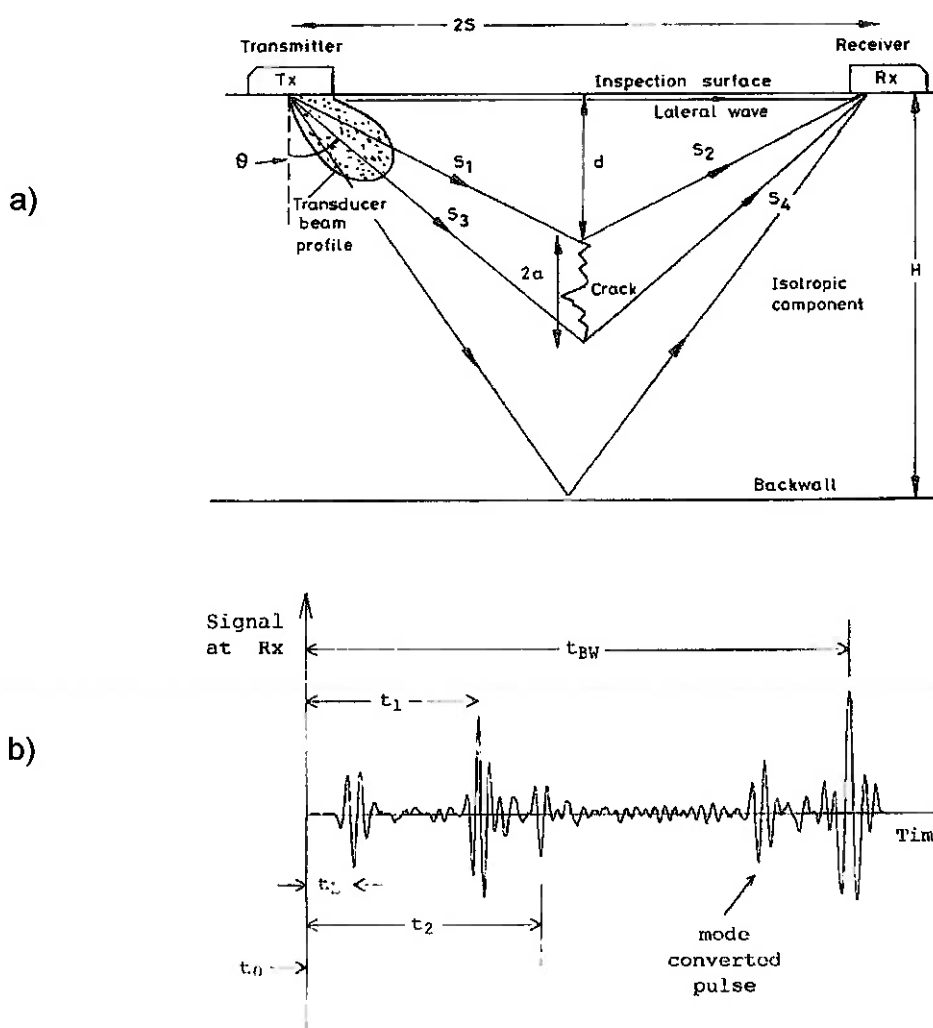


Figura 4a – Posição dos transdutores e sinal recebido, 4b – onde t_0 é a onda de superfície, t_1 é a onda refletida da extremidade superior da falha, t_2 é a onda refletida da extremidade inferior da falha e t_{BW} é a onda refletida na parede inferior da placa.

O tempo de viagem (ou de vôo) dos sinais difratados, relativos a onda plana e o eco final podem ser usados para calcular o tamanho entre bordas dos defeitos como mostrado na figura 4. Assume-se que o defeito está posicionado simetricamente entre os transdutores, posição esta que pode ser achada movendo o arranjo (mantendo a distância entre eles constante) junto com a linha que os une até que o atraso dos sinais difratados seja mínimo. No caso da figura 4a, o tempo correspondente ao vôo da onda S_1+S_2 e da onda S_3+S_4 são, respectivamente, t_1 e t_2 . Dados experimentais e teóricos mostram que a zona angular para inspeções precisas e confiáveis é de 40° a 80° , normal a superfície da placa. Nota-se que se a pressão acústica for suficiente para alcançar o defeito e conseqüentemente chegar ao transdutor de recepção, o ângulo destes não é tão importante, nem a amplitude do sinal. A única informação significativa é o tempo de vôo e é por isso que a técnica tem este nome.

Apesar de a técnica poder ser usada com ondas transversais, esta é normalmente usada com ondas longitudinais. Quando o feixe ultra-sônico choca-se contra uma superfície ou defeito a qualquer ângulo que não seja a incidência normal, parte da energia será convertida para outros modos de onda, ou seja, se a onda incidente é longitudinal então alguma energia transversal será obtida nas ondas refletidas e difratadas provenientes. Como a velocidade das ondas transversais é aproximadamente a metade das ondas longitudinais, é necessário saber o tipo das ondas dos sinais para calcular a profundidade dos defeitos. O método TOFD é normalmente usado com transdutores de ondas longitudinais para que os principais sinais difratados sejam longitudinais e cheguem bem à frente de qualquer sinal que possa ter viajado pelo corpo de provas (apêndice A) como ondas transversais. Entretanto, não há qualquer motivo teórico para não usá-las.

3.6 Ensaio Experimental

Foram realizados ensaios preliminares em um tanque de imersão no Laboratório de Sensores e Atuadores do Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, com

a finalidade de se familiarizar com a aquisição de sinais de ultra-som, para se obter imagens de superfícies.

Imagens de superfícies podem ser obtidas a partir do sinal de ultra-som pela análise da amplitude ou da posição, na escala de tempo, do sinal refletido pela respectiva parede. Conhecida a posição, por exemplo, do pico do sinal em relação a uma dada referência, temos que para cada ponto, o sinal será refletido ou não, dependendo da posição da superfície em relação ao transdutor.

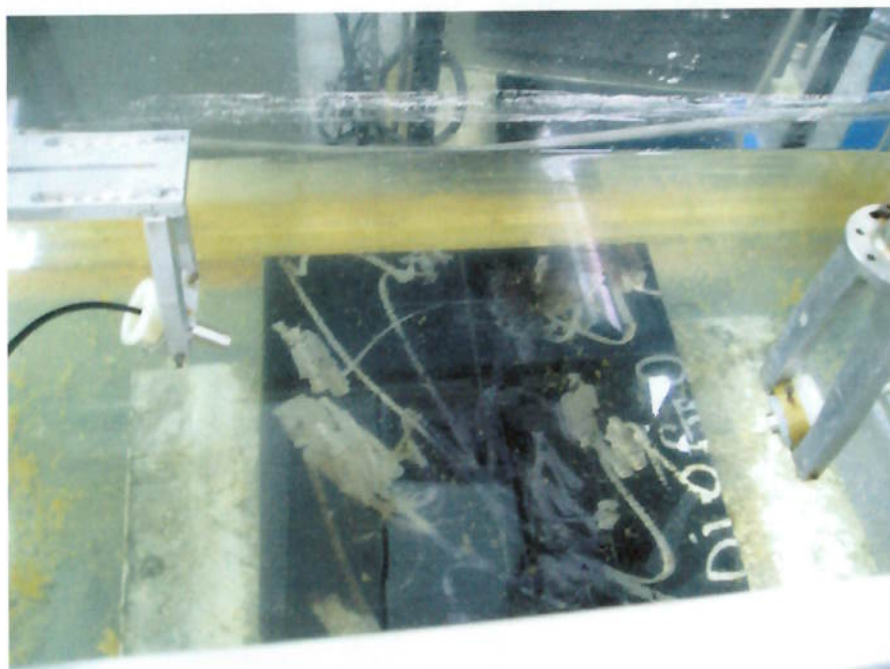


Figura 5 – Ensaio realizado no tanque de provas.

4 PROTÓTIPO DO SISTEMA DE INSPEÇÃO:

Após o estudo e ensaio experimental da técnica a ser utilizada, foi desenvolvido o sistema que irá aplicá-la. Este sistema compreende a parte mecânica, elétrica, eletrônica e lógica do protótipo, sempre visando a comprovação da técnica. Para tal, será descrito no decorrer da monografia o projeto e análise de cada um dos subsistemas supracitados. A figura 6 representa o modelo idealizado de funcionamento.

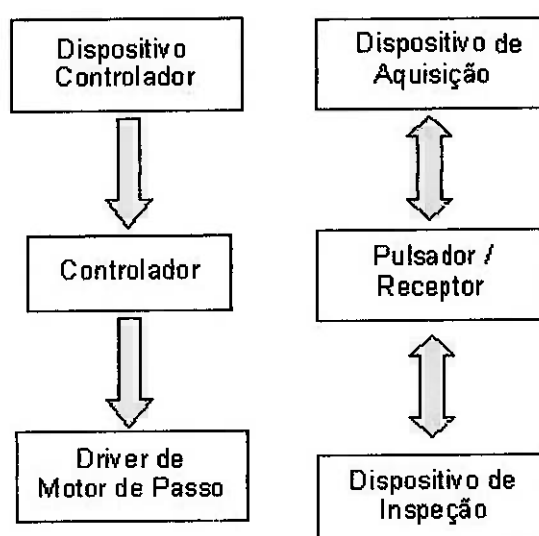


Figura 6 – Diagrama de blocos do sistema de inspeção.

O sistema de inspeção é composto pelos seguintes elementos:

- 1) Dispositivo de inspeção: um sistema mecânico – capaz de realizar uma determinada trajetória sobre uma superfície metálica – à qual está acoplado um transdutor de ultra-som utilizado na medição de espessura da chapa.
- 2) Driver de potência de motor de passo: que recebe sinais de controle e envia a seqüência de fases correspondente para o acionamento de um motor de passo;
- 3) Dispositivo controlador: que a partir de uma determinada trajetória definida pelo usuário, configura os sinais de controle para o acionamento do motor de passo.
- 4) Controlador: que faz a comunicação do dispositivo controlador com o driver do motor de passo.
- 5) Dispositivo de aquisição: que recebe os dados adquiridos na inspeção.

6) Pulsador/Receptor: gera os pulsos elétricos de excitação do transdutor de ultrassom e envia um trigger para o dispositivo de aquisição.

4.1 Projeto Mecânico

O subsistema mecânico do protótipo compreende os transdutores e todos os componentes utilizados para a correta fixação dos mesmos e sua locomoção remota.

4.1.1 Dispositivo de movimentação

O dispositivo de movimentação que levará os transdutores foi idealizado conforme esquema das figuras abaixo:

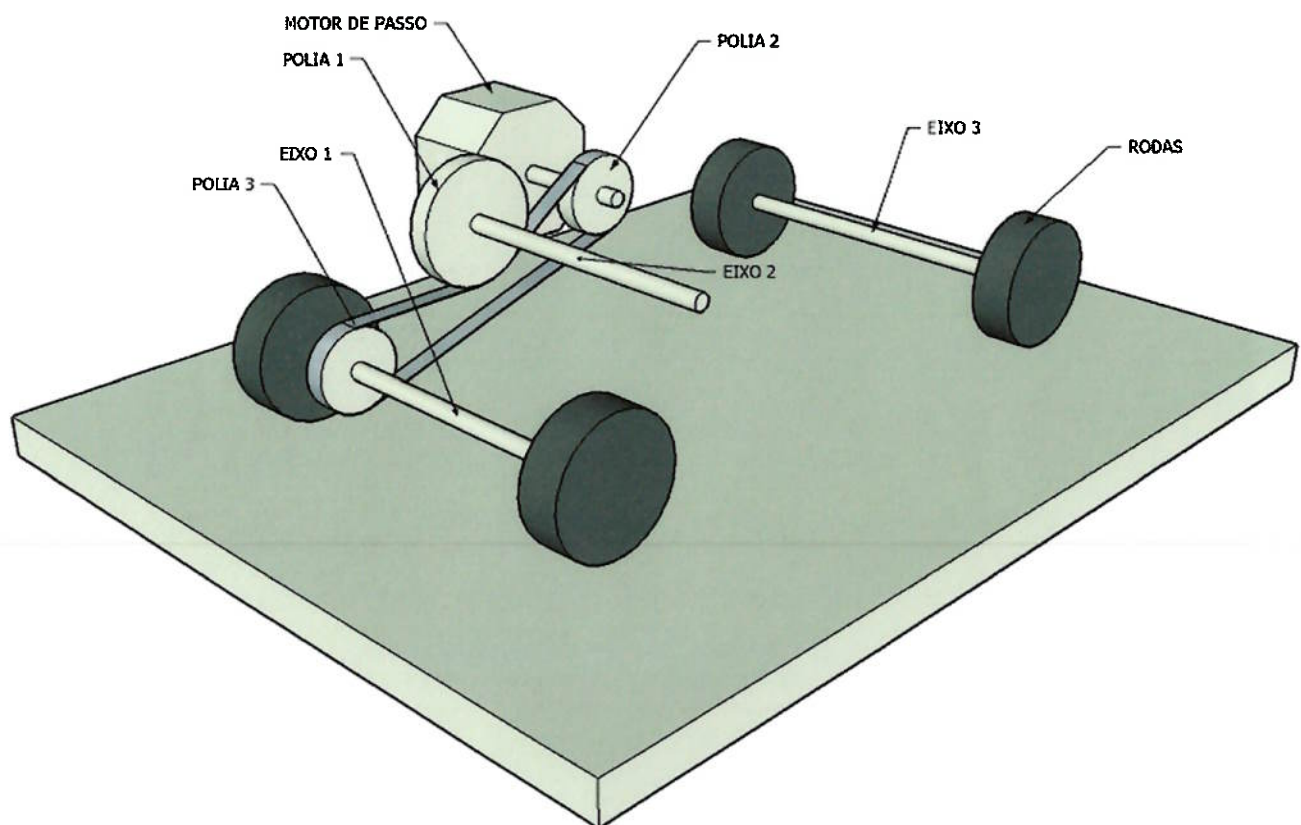


Figura 7 – Vista "A" do projeto mecânico.

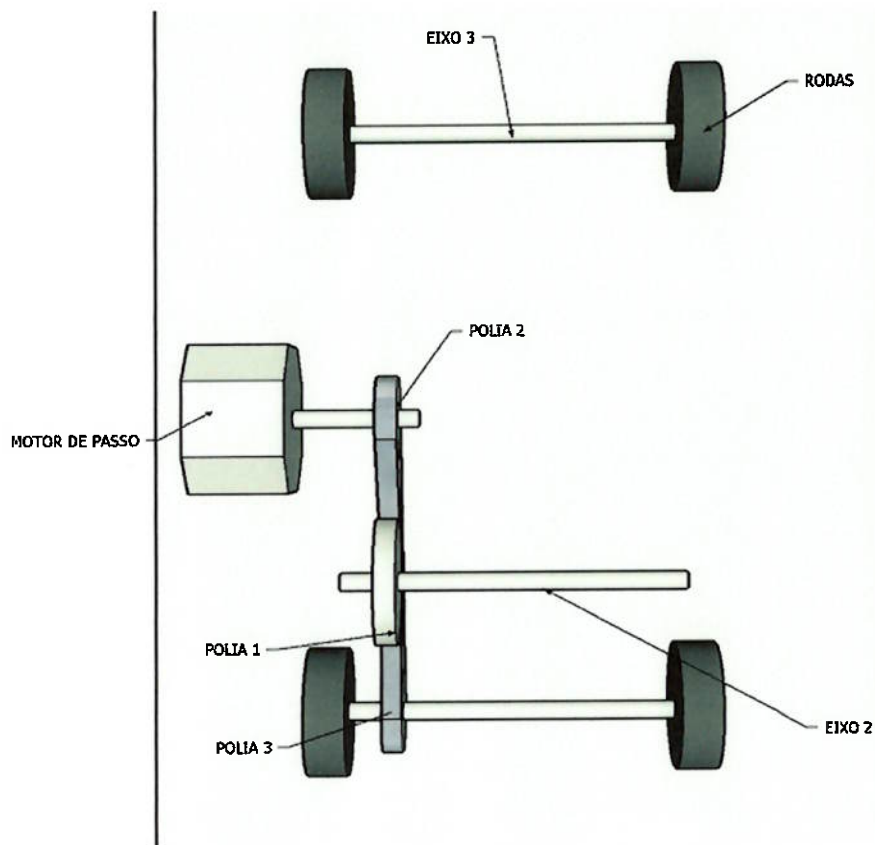


Figura 8 - Vista "B" do projeto mecânico.

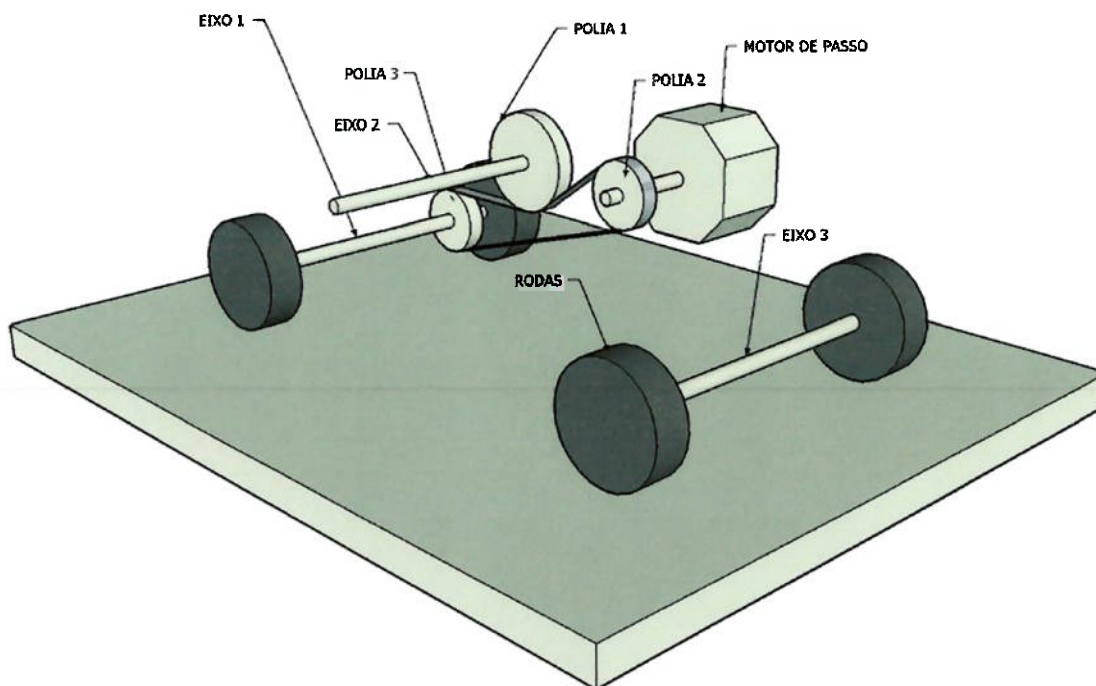


Figura 9 - Vista "C" do projeto mecânico.

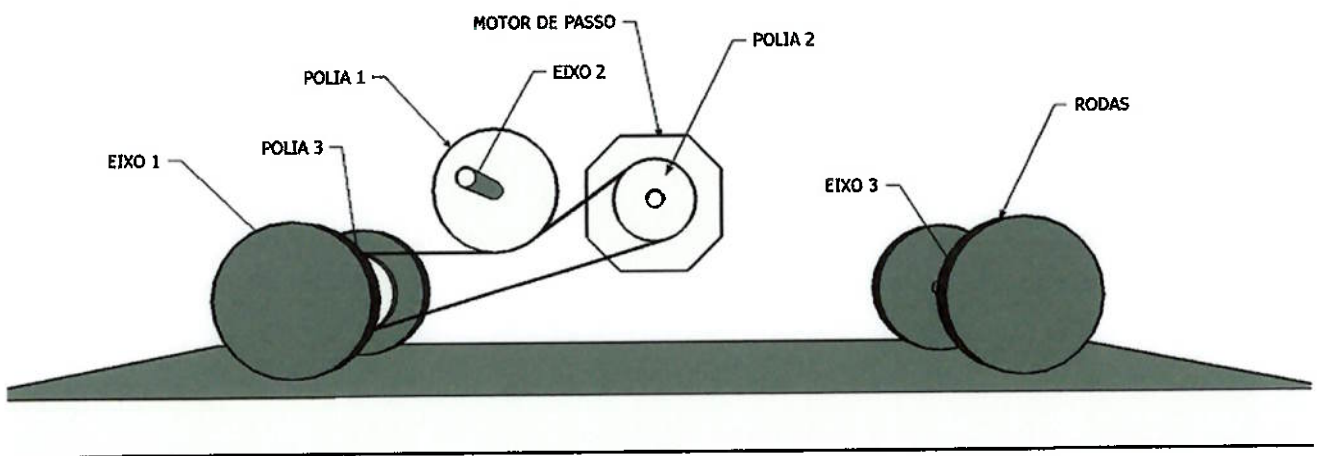


Figura 10 - Vista "D" do projeto mecânico.

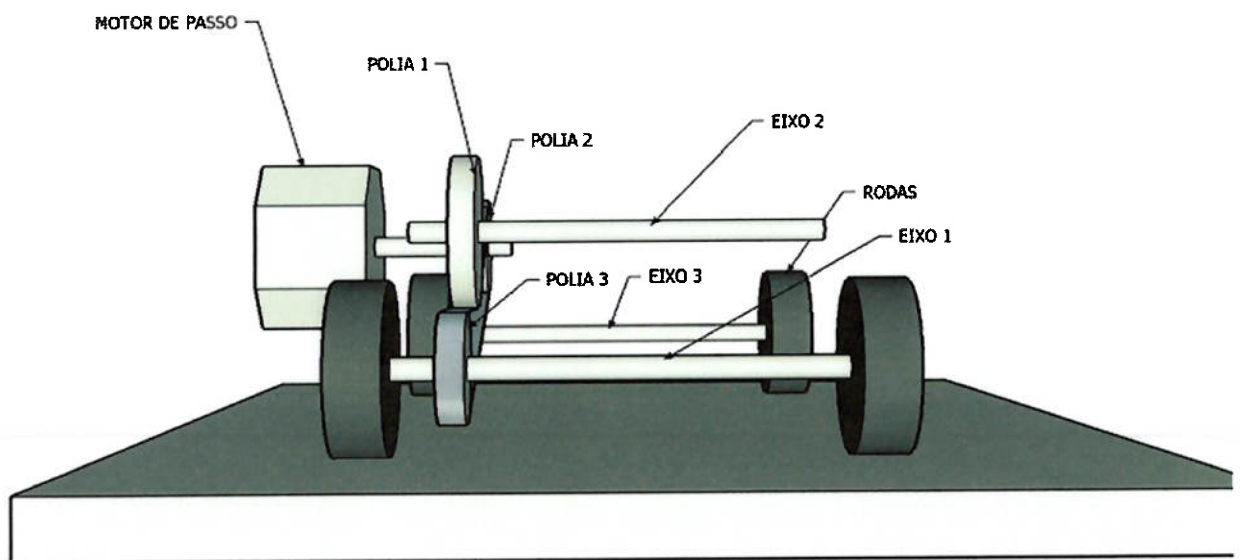


Figura 11 - Vista "E" do projeto mecânico.

Para a concepção do projeto mecânico do sistema que contém o transdutor de ultra-som, foram consideradas as seguintes características:

- Dispositivo capaz de realizar uma trajetória genérica em movimento plano;

- Sem escorregamentos pela superfície, o que poderia afetar o controle de seu movimento e, conseqüentemente, a inspeção por ultra-som;
- Capaz de subir e descer paredes;
- Configuração geométrica que permita a adaptação do módulo de inspeção;

Este projeto possui diversas peculiaridades, definidas de modo a trazer para o protótipo algumas funcionalidades adicionais desejáveis, seja para seu funcionamento presente ou futuro.

4.1.2 Acoplamento Magnético

Optou-se por utilizar um acoplamento magnético entre o dispositivo de movimentação e o corpo de provas, devido a sua fácil construção, ao seu baixo custo e a flexibilidade cujo sistema ganha, podendo ser utilizado em tubulações, executando uma volta completa em sua circunferência, por exemplo. O acoplamento magnético pode ser feito através de rodas imantadas conforme ilustrado na figura 12 abaixo:

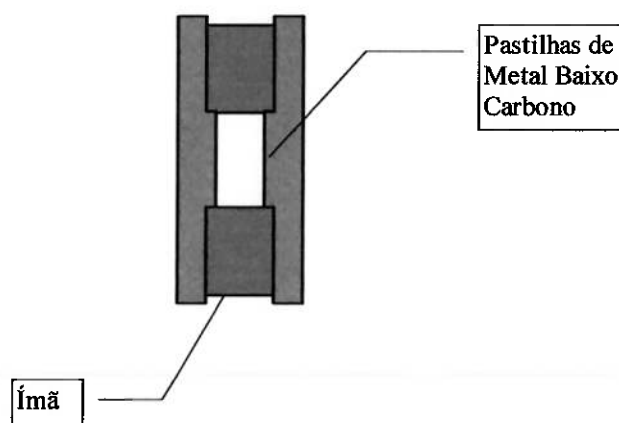


Figura 12 – Rodas Magnéticas.

Duas pastilhas de aço baixo carbono são acopladas a um ímã em forma de disco com o objetivo de orientar as linhas de fluxo magnético radialmente. O material magnético pode ser ferrite de bário, ferrite de estrôncio ou um ímã de terras raras, como o samário-cobalto, dependendo da força de acoplamento magnético exigida. No caso foram usados ímãs de Neodímio-Ferro-Boro.

4.1.3 Escolha do Motor de Passo

Para determinação de um motor de passo conveniente para o sistema é necessário que se efetue uma análise dinâmica do projeto. A fórmula que fornece o torque solicitante sobre o motor de passo é como se segue :

$$T_M = J_R * \frac{\partial \omega}{\partial t} + D\omega + T_f$$

onde :

J_R = Inércia total do sistema refletida sobre o rotor do motor de passo

ω = Velocidade angular do rotor

D = Constante de fricção viscosa

T_f = Torque Friccional

Os termos torque friccional e fricção viscosa dependem de coeficientes empíricos, e serão eliminados dos cálculos, sendo substituídos por um coeficiente de segurança adequado.

Em termos de taxa de passo (passos por segundo) a equação pode ser escrita da seguinte forma :

$$T_M = \theta_s J_R \frac{df}{dt}$$

onde :

θ_s = ângulo de passo (radianos)

f = taxa de passo (passos por segundo)

Logo é preciso calcular, antes de tudo, a inércia refletida no rotor do motor. Feito isso, escolhe-se n , o número de passos por revolução do motor e determina-se qual deverá ser a aceleração do sistema em termos de passos por segundo.

Uma vez determinado o torque necessário é feita uma comparação com a curva de torque do motor a ser utilizado, devendo o ponto de operação estar bem abaixo da curva fornecida pelo fabricante.

Em relação às características de torque fornecidas pelo fabricante, é interessante notar que há três tipos de torque que devem ser considerados, sendo eles o torque residual, o torque de travamento e o torque dinâmico.

O torque residual é o torque existente no motor de passo quando o mesmo não está energizado. O torque aparece devido ao fluxo magnético do ímã permanente do rotor do motor. O valor do torque é de aproximadamente 10% do torque de travamento.

O Torque de Travamento é o torque resistente que o motor oferece quando a alimentação está ligada, mas o motor está parado. O torque de travamento é em geral 110 a 115% do torque nominal.

Finalmente, o torque dinâmico que é o que deve ser considerado na análise dinâmica a ser feita subdivide-se em torque *pull-in* e o torque *pull-out*. O torque *pull-in* é o torque que o motor oferece para partida e parada sem perda de passo. O torque *pull-out* é o torque que o motor oferece quando é lentamente acelerado. A diferença entre as curvas de *pull-in* e *pull-out* é a inércia do rotor do motor, podendo a mesma ser desconsiderada a baixas rotações, fazendo a curva de *pull-in* e *pull-out* praticamente idênticas.

Como o peso total do sistema não chega a 3 quilos, o motor de passo disponível foi considerado suficiente para a tarefa proposta, pois a curva de torque fornecida pelo fabricante prevê um torque acima de 0.28N*m para uma frequência de acionamento de 100pps. Segue abaixo os dados do mesmo:

- Fabricante: Pacific Scientific
- Tipo: P2H
- Voltagem: 24 V/fase
- Corrente: 0.5 A/fase
- Precisão: 1.8°/passo

4.1.4 Estrutura

A estrutura do dispositivo de locomoção do sistema já foi previamente disponibilizada para este projeto. Contudo, devido a diversos motivos, foi necessária a modificação deste, dentre os quais podemos citar a falta de alguns componentes originais do conjunto e a simplificação no dimensionamento dos componentes restantes.

4.1.5 Sistema de fixação dos transdutores

O sistema de fixação dos transdutores foi projetado visando a simplicidade de construção, aliada a perfeita funcionalidade do sistema. Nele, os transdutores poderão correr horizontalmente sendo ajustados na posição ideal para a inspeção. Sua montagem pode ser vista abaixo:

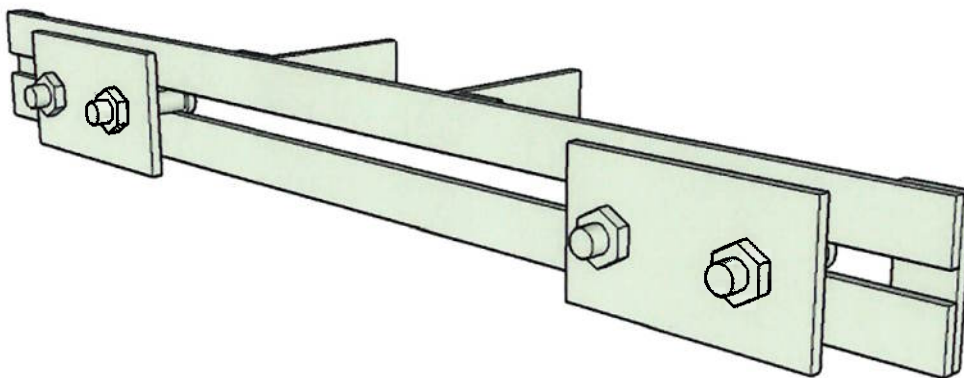


Figura 13 - Vista "A" do sistema de fixação dos transdutores.

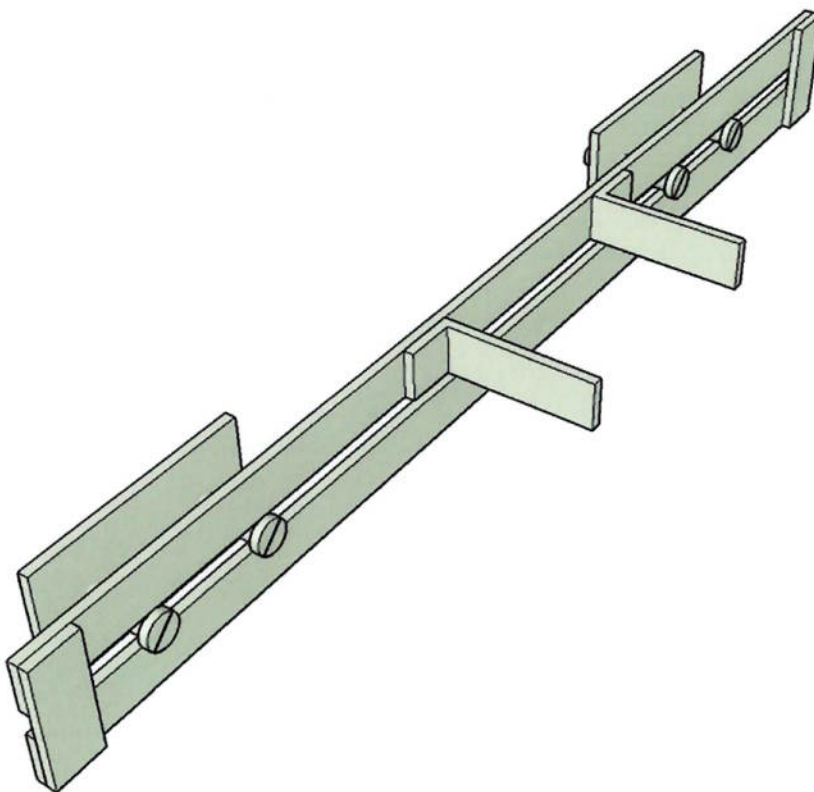


Figura 14 - Vista "B" do sistema de fixação dos transdutores.

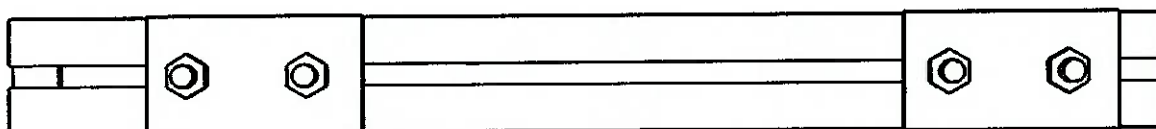


Figura 15 - Vista "C" do sistema de fixação dos transdutores.

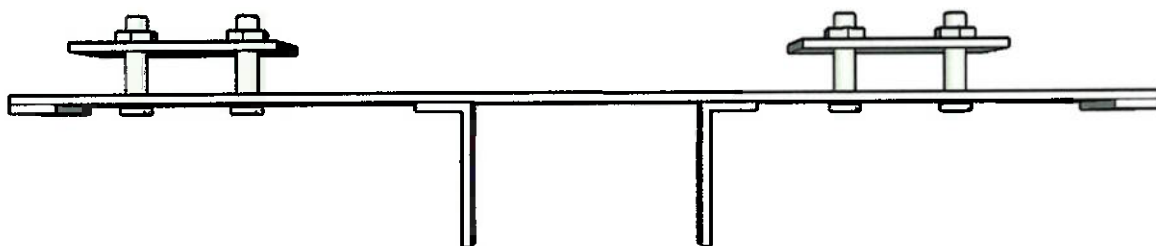


Figura 16 - Vista "D" do sistema de fixação dos transdutores.

4.2 Projeto Elétrico e Eletrônico

Este subsistema engloba toda a elétrica e eletrônica do protótipo, necessárias para seu perfeito funcionamento, podendo ser citados o driver do motor de passo, o controlador utilizado e suas ligações, o dispositivo controlador com diversas entradas e a fonte de alimentação selecionada.

4.2.1 Fonte de alimentação

A fonte de alimentação utilizada neste protótipo foi uma fonte para computadores padrão AT, onde apenas as saídas de 12V e terra (GND) foram utilizadas. O controlador utilizado (Jackrabbit BL1810) se encarrega de gerar os sinais TTL que serão usados.

4.2.2 Dispositivo de controle

O controle projetado (figura 17) dispõe de diversas entradas, podendo estas serem utilizadas para os mais diversos fins. Nesta etapa serão utilizadas 3 entradas, mais o botão liga-desliga, sendo estes responsáveis pela escolha da rotação do motor no sentido horário, no sentido anti-horário e sua movimentação, respectivamente. Estes sinais vão diretamente para o Jackrabbit, e deste para o driver do motor de passo.



Figura 17 – Controle projetado.

4.2.3 Controlador

O controlador utilizado foi o Jackrabbit BL1810, que possui as seguintes especificações:

- 29.5 MHz clock
- 24 CMOS-compatível I/O
- 3 canais analógicos: 1 A/D input, 2 PWM D/A outputs
- 4 high-power outputs (configurados de fábrica como 3 sinking e 1 sourcing)
- 4 portas seriais (2 RS-232 ou 1 RS-232 com RTS/CTS, 1 RS-485, e 1 CMOS-compatível)
- 6 timers (cinco 8-bit timers e uma 10-bit timer)
- 128K SRAM, 256K flash EPROM
- Real-time clock
- Watchdog supervisor

- Regulador de voltagem
- Bateria de backup

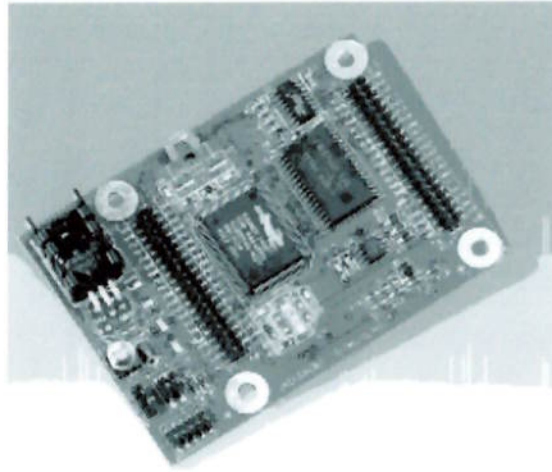


Figura 18 – JackRabbit.

O JackRabbit está conectado a placa de desenvolvimento necessária para a programação de desenvolvimento de aplicativos para ele. Esta é a responsável por receber todas as entradas do sistema e manipula-las de acordo com o programa em sua memória. Dela sai o controle para o motor de passo, diretamente para o driver. Os três sinais enviados para o driver – sentido, clock e enable – são enviados através de uma porta paralela de 8 bits, PORT A do JackRabbit.

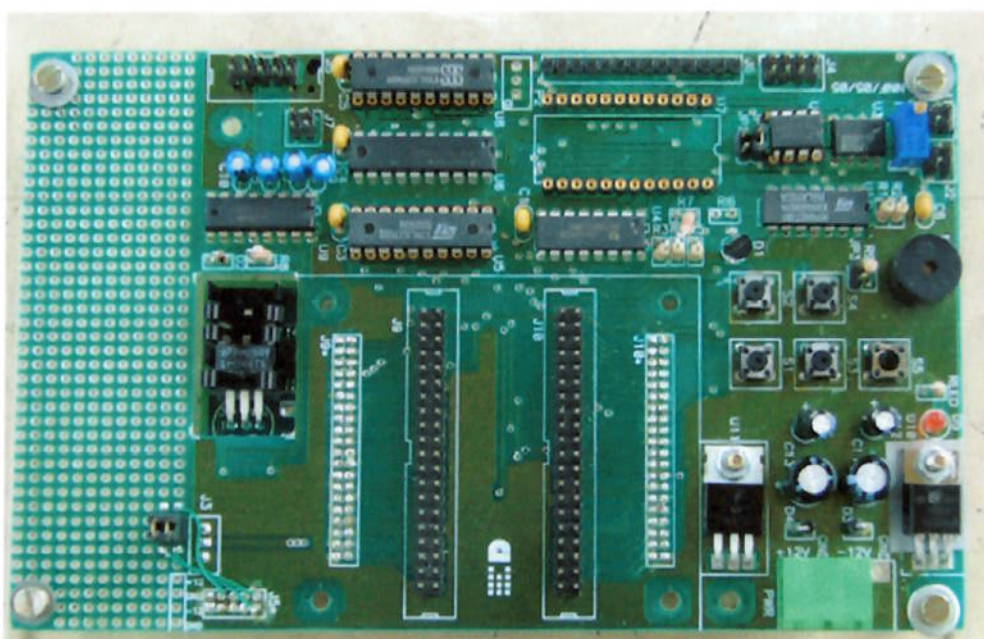


Figura 19 – Placa de desenvolvimento.

4.2.4 Driver do motor de passo

O driver, ou placa acionadora de motor de passo utilizado é constituída por dois circuitos independentes de acionamento de motor de passo, ou seja, dois motores podem ser acionados por uma única placa. Cada circuito é composto por um CI lógico (STL297) que contém a sequência de acionamento das fases, funcionando em modo Full ou Half Step, e por um CI de potência (STL298) que fornece a tensão e corrente necessária para o acionamento do motor.

O circuito aqui empregado é baseado no Application Note da SGS-THOMSON. Assim, detalhamento do funcionamento do circuito e seus componentes pode ser melhor compreendido através de sua consulta. Segue, em anexo, o esquema elétrico da placa.

Esse driver é acionado por três sinais de controle: (1) sentido horário/anti-horário; (2) clock; e (3) enable, que são fornecidos pelo JackRabbit.

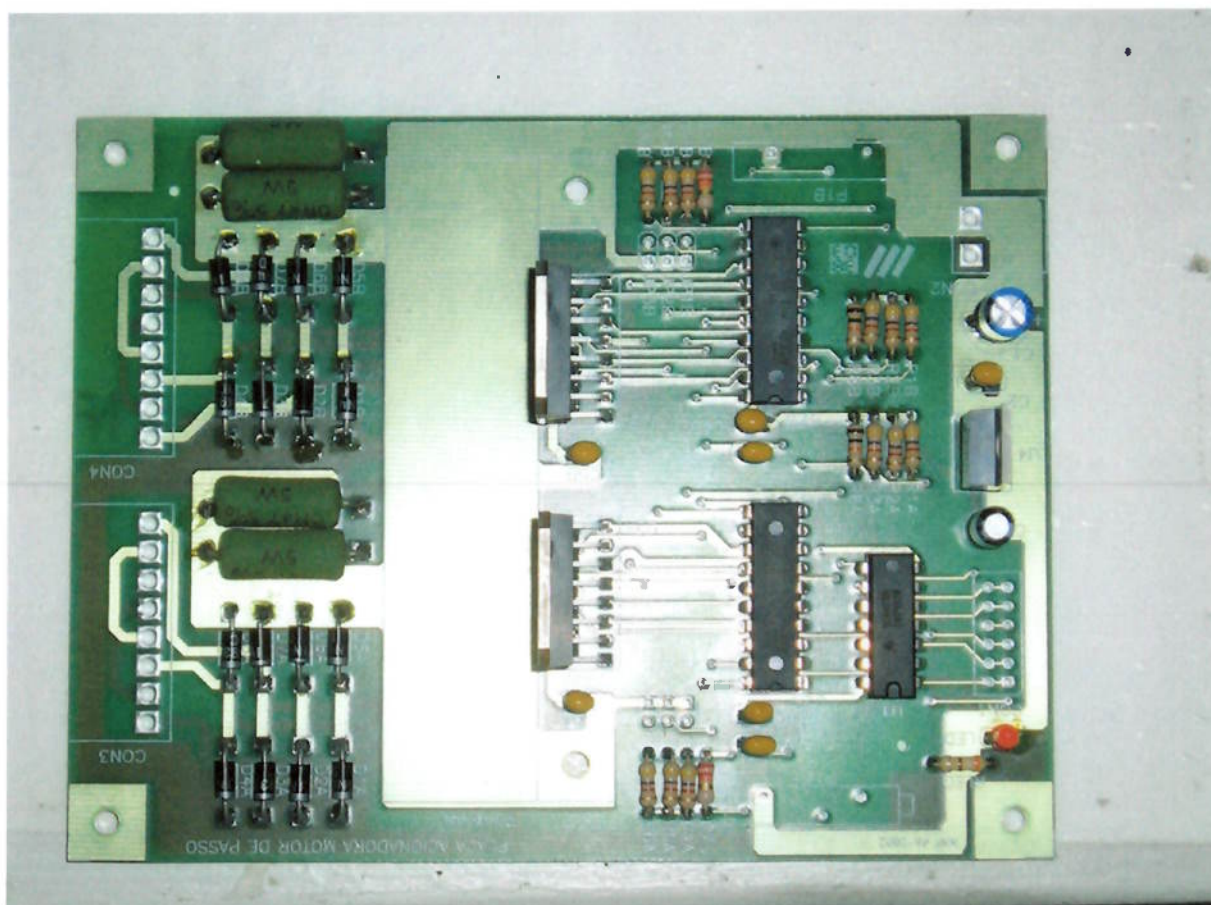


Figura 20 – Driver do motor de passo.

Como este driver é bipolar, e o motor disponível é unipolar, foi necessário a ligação interna do motor conforme a figura 21.

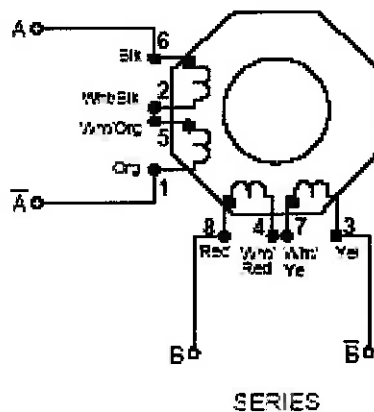


Figura 21 – Esquema de ligação do motor de passo.



Figura 22 – Pinagem do motor de passo.

4.2.5 Dispositivo de aquisição

O diagrama de Blocos do dispositivo de aquisição se encontra descrito na figura a seguir :

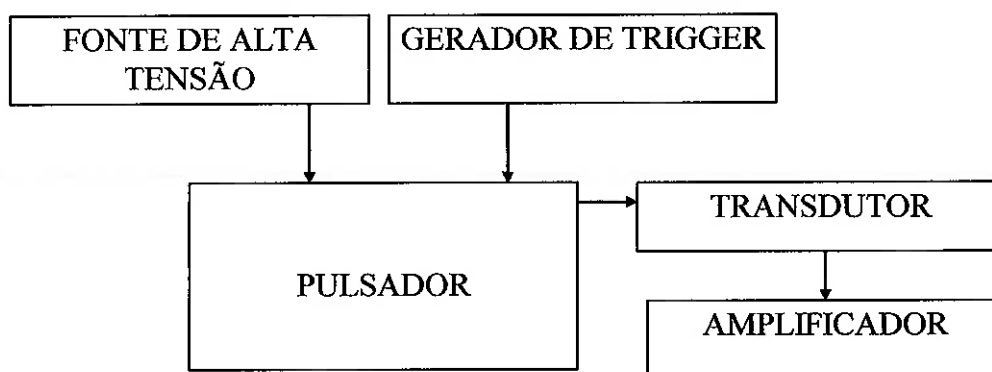


Figura 23 - Diagrama de Blocos do Pulsador

O pulsador é constituído basicamente de uma fonte de alta tensão para excitação do pulsador, um gerador de *trigger* e um amplificador de eco. O *trigger* gerado pela placa pulsadora sincroniza todo o sistema, que excita o transdutor com

um pulso curto de alta tensão e amplifica um possível eco a ser recebido pelo pulso ultra-sônico. Este eco é ainda amplificado pelo amplificador até um nível de tensão de 5V, quando o eco poderá ser reconhecido pela lógica de controle digital.

Para o caso do protótipo proposto, será utilizado um osciloscópio como a saída da inspeção.

4.3 Programação

A programação do controlador se dá através do software Dynamic C. O programa desenvolvido é simples, porém adequado para o funcionamento do protótipo. Após extenso estudo para entender o funcionamento tanto do JackRabbit quanto do Dynamic C, é possível gerar versões mais sofisticadas do programa de funcionamento rapidamente, criando novas funcionalidades que mostrar-se-ão úteis de acordo com o surgimento de novas necessidades.

5 RESULTADOS OBTIDOS

5.1 Arranjo Experimental

O arranjo experimental pode ser visto nas figuras a seguir:



Figura 24 – Vista lateral do arranjo experimental.

Nota-se que este arranjo foi feito de modo a isolar apenas uma parte (a direita da figura 24) do corpo de provas, onde, para se obter um perfeito acoplamento entre ele e os transdutores, uma pequena lâmina de água foi acrescentada. Para isso, tiras de acrílico moldaram a região a ser inspecionada e utilizou-se vaselina para impedir o escoamento da mesma.

Como dispositivos de aquisição, faz-se o uso de um osciloscópio para visualização em tempo real do sinal obtido, além do dispositivo responsável pela aquisição dos dados no computador, onde estes serão analisados posteriormente.



Figura 25 – Vista superior do arranjo experimental.



Figura 26 – Vista lateral do arranjo experimental.

5.2 Ensaio Experimental

Com o sistema montado e com o auxílio do osciloscópio, a distância entre os transdutores foi ajustada em 84 milímetros, obtendo um bom nível de sinal de saída.

Assim, com o sistema posicionado, foi feito um ensaio experimental, onde os dados gerados sobre o corpo de provas foram obtidos e comparados com a teoria apresentada na seção 2.4 (lei de snell), figura 4a, sendo considerados extremamente próximos ao esperado, podendo-se notar claramente que o tempo de vôo aumenta conforme seu caminho se torna mais longo, ou seja, conforme a profundidade da falha aumenta, como pode-se ver nas figuras a seguir a semelhança com o sinal obtido na figura 4b:

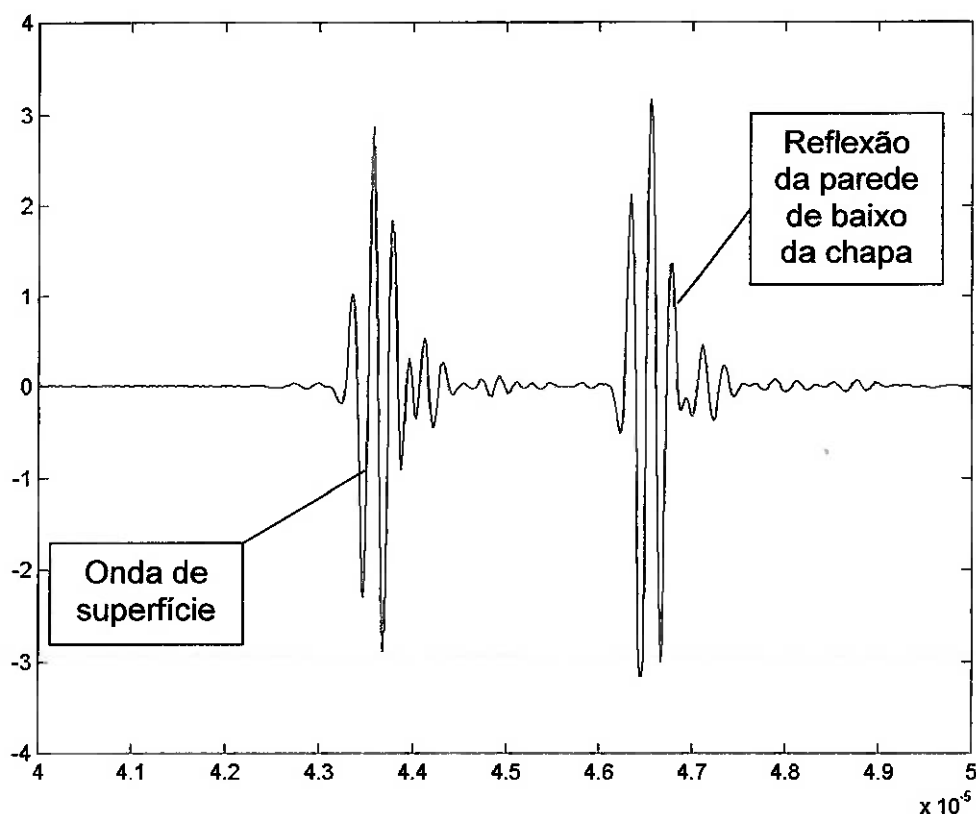


Figura 27 – Sinal obtido durante inspeção de trecho sem falha.

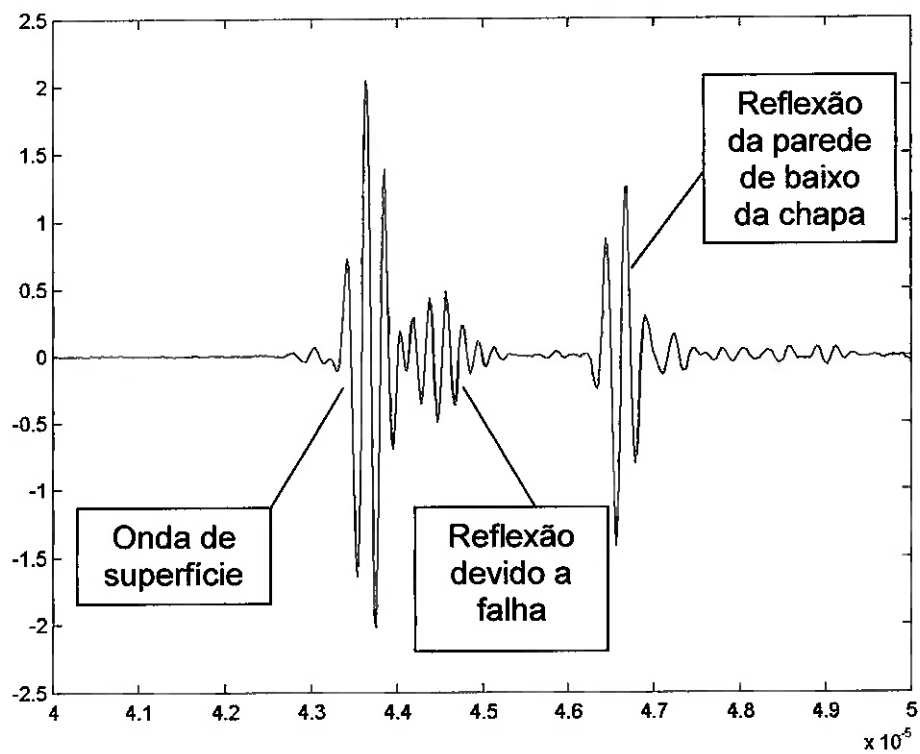


Figura 28 - Sinal obtido durante inspeção de trecho com falha de 2mm de profundidade.

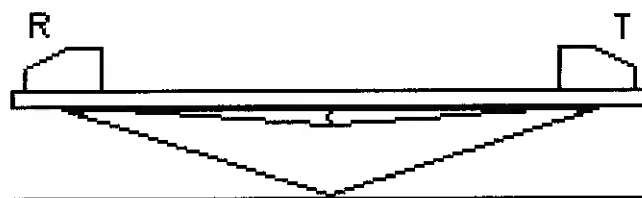


Figura 29 – Arranjo experimental para o trecho com falha de 2mm de profundidade, onde T indica o transdutor transmissor e R indica o transdutor receptor.

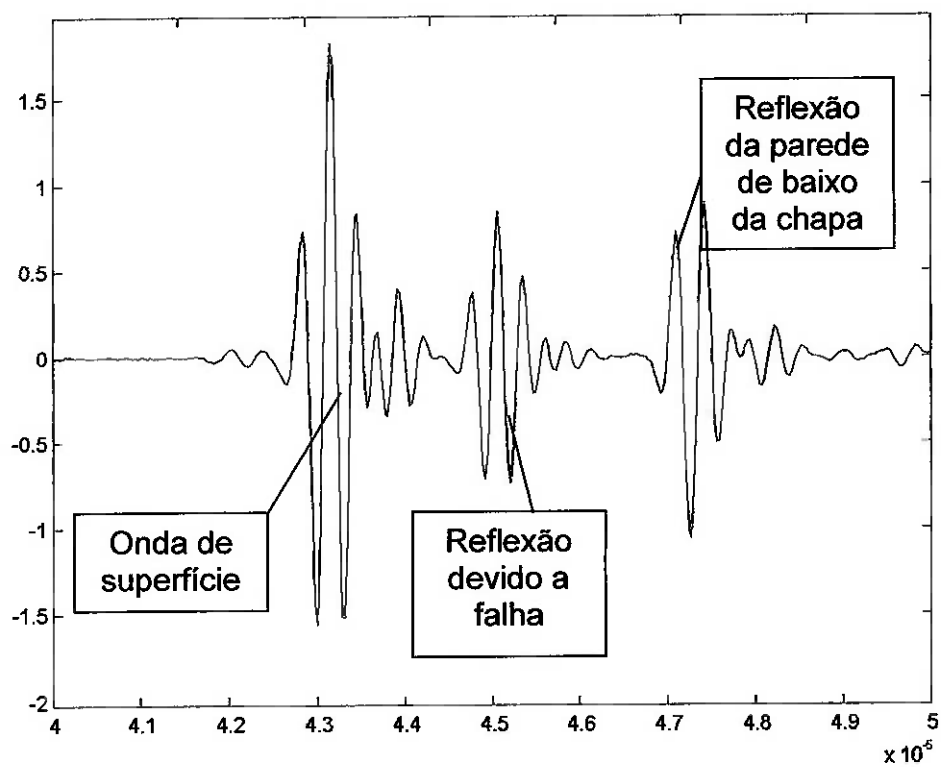


Figura 30 - Sinal obtido durante inspeção de trecho com falha de 4mm de profundidade.

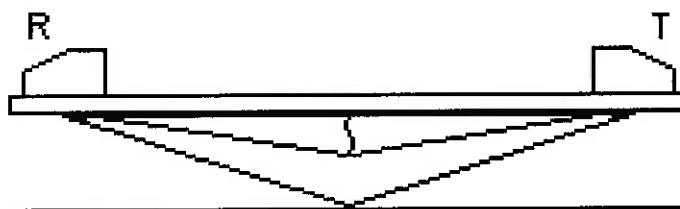


Figura 31 – Arranjo experimental para o trecho com falha de 4mm de profundidade, onde T indica o transdutor transmissor e R indica o transdutor receptor.

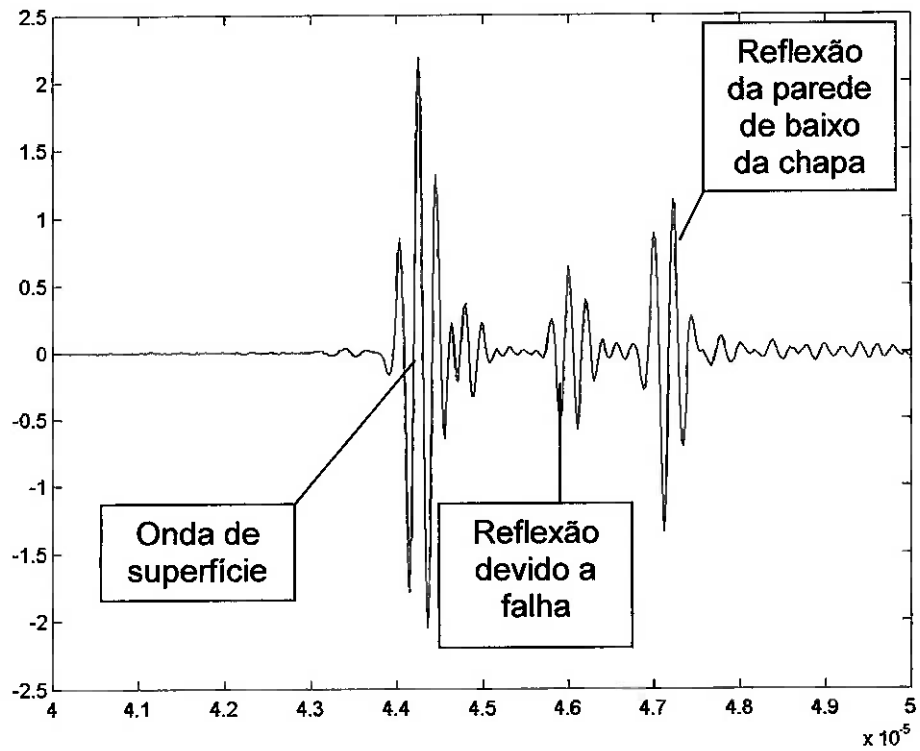


Figura 32 - Sinal obtido durante inspeção de trecho com falha de 6mm de profundidade.

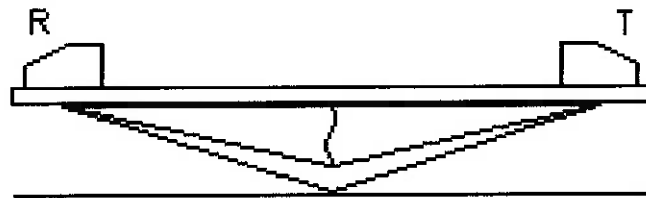


Figura 33 - Arranjo experimental para o trecho com falha de 6mm de profundidade, onde T indica o transdutor transmissor e R indica o transdutor receptor.

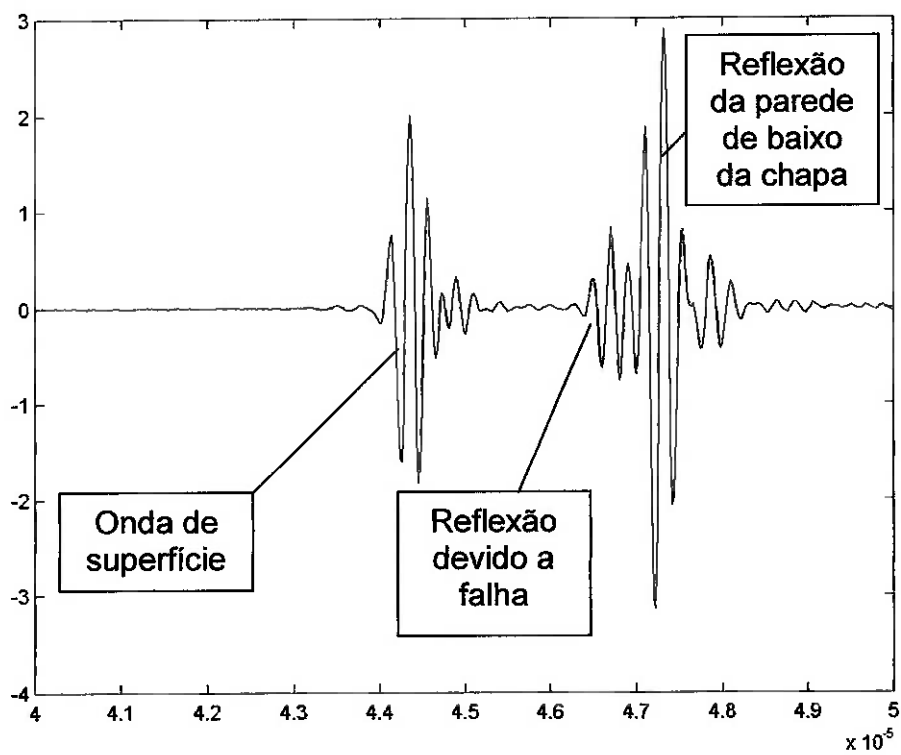


Figura 34 - Sinal obtido durante inspeção de trecho com falha de 8mm de profundidade.

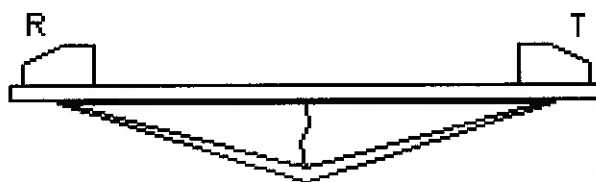


Figura 35 - Arranjo experimental para o trecho com falha de 8mm de profundidade, onde T indica o transdutor transmissor e R indica o transdutor receptor.

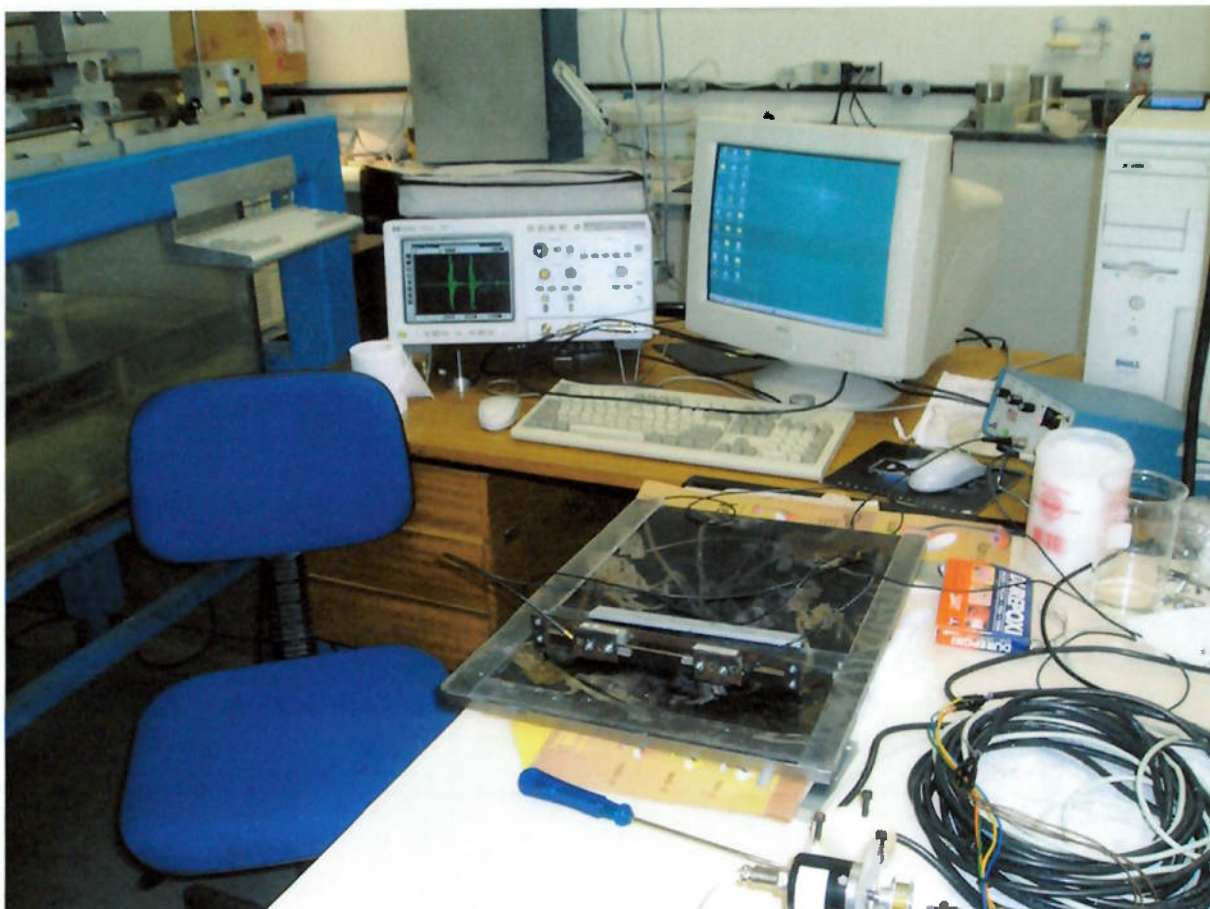


Figura 36 – Condições do teste.

6 CONCLUSÃO

Extensivos estudos sobre a técnica ultra-sônica TOFD foram realizados, bem como estudos sobre toda a mecânica, eletrônica e lógica de controle envolvida no projeto. O protótipo foi construído e seus testes iniciados, onde resultados satisfatórios foram alcançados, como a detecção das falhas e visualização das diferenças de profundidades entre elas. Alguns contratempos podem ter impedido este estudo de ser melhor aprofundado, como a dificuldade em conciliar o último ano de faculdade com todas as tarefas possíveis de se aplicar neste abrangente tema e a dificuldade em encontrar algumas peças especificadas no projeto mecânico. Mas os objetivos propostos, dentre eles o entendimento do método TOFD e o desenvolvimento de um sistema para sua correta aplicação, foram alcançados. Principalmente o objetivo que um trabalho de formatura se propõe, que é justamente a integração de diversas disciplinas aprendidas durante todos os anos de estudo em um único projeto de engenharia. Contudo, o presente trabalho pode abrir caminho a uma série de inovações, já que o método TOFD ainda não ser largamente utilizado e possuir diversas vantagens já citadas em relação a outras técnicas de ensaio não destrutivo. Possíveis aprofundamentos deste tema poderiam englobar tanto o refinamento dos resultados obtidos com a técnica TOFD quanto o refinamento da automatização do sistema, ou a melhor integração entre todos os sistemas desenvolvidos.

REFERÊNCIAS

ASNT Handbook - *"Ultrasonic Testing"*, editor P. McIntire, Vol. 7, ASNT, New York, 1991.

CARVALHO, A. A.; SILVA, I. C.; SOARES, R. R. S.; *"Detecção e Dimensionamento de Descontinuidades em Cordão de Solda Utilizando a Técnica Ultra-sônica TOFD"*, Nova Friburgo, 2004.

FUKUTOMI, H.; *"Development of Advanced Ultrasonic Inspection System for High Energy Steam Piping"*, 2003.

GORDON, J. E.; *"The new science of strong materials"*, Penguin Books, Harmondsworth, 1976.

KOMURA, I. et al; *"Crack detection and sizing technique by ultrasonic and electromagnetic methods"*, Elsevier, 2001.

MOURA, E. P.; SIQUEIRA, H. S.; REBELLO, M. A.; *"Pattern Recognition of Weld Defects in Preprocessed TOFD Signals Using Linear Classifiers"*, Journal of Nondestructive Evaluation, Vol. 23, No. 4, 2004.

MOURA, E. P.; VASCONCELLOS, A. A.; *"Development of an Automatic Inspection Equipment Based on the TOFD Technique."*, COBEM Ouro Preto, 2005.

SILK, M. G. et al; *"Ultrasonic time domain measurements of the depth of crack-like defects in ferritic and austenitic steels."*, 1976.

VEIGA, B. C.; CARVALHO, A. A.; *"Classification of Pulso-eco and TOFD Ultra-Sonic Signals Using Artificial Neural Network"*, COBEM Ouro Preto, 2005.

KINSLER, L. E., FREY, A. R.: *"Fundamentals of acoustics"*. 2ª. Ed. John Wiley & Sons.

KRAUTKRAMER, J. & H.; *"Ultrasonic Testing of Materials"*. 4ª edição, 1990. Editora Springer-Verlag.

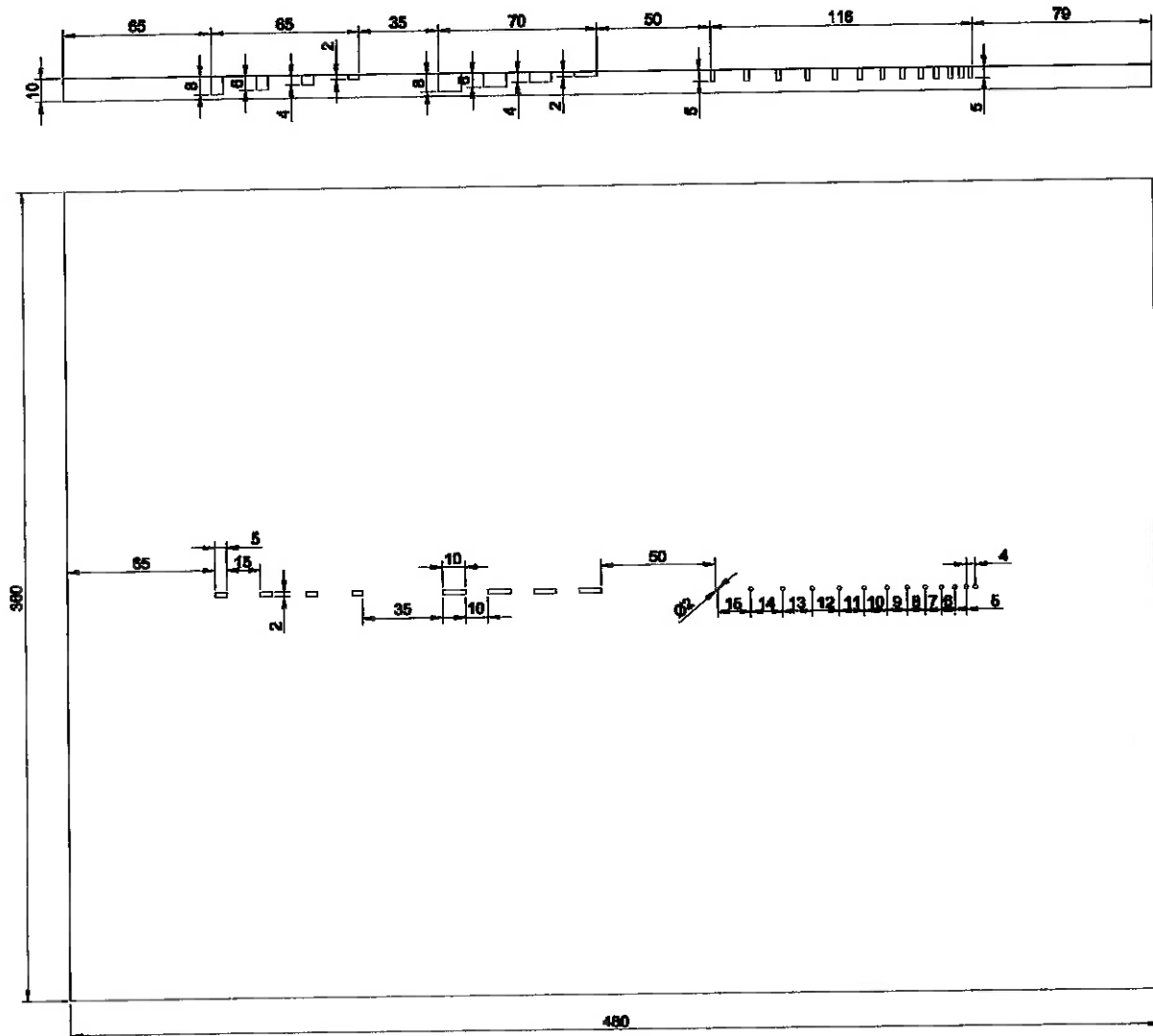
Jackrabbit (BL1800 Séries) Documentation, Z-WORLD.

RÉFRACTION; Disponível em: <<http://semsci.u-strasbg.fr/refracti.htm>>. Acesso em: 26 jun 2006.

TRANSDUCERS Ultrasonic Field; Disponível em: <<http://www.signal-processing.com/transducers/theory.htm>>. Acesso em: 26 jun 2006.

STMICROELECTRONICS – Stepper Motor Driving; Disponível em:
<<http://www.st.com/stonline/books/ascii/docs/1679.htm>>. Acesso em 08 jan 2007.

APÊNDICE A – CORPO DE PROVA



APÊNDICE B – PROGRAMA DE ACIONAMENTO DE MOTOR DE PASSO

```

// Sinal de controle de motor de passo utilizando o port A do Jackrabbit BL1810.
void DELAY();      // controle da velocidade
main(){
    int button1,      // Sentido horário
        button2,      // Sentido anti-horário
        button3;      // Move o motor
    button1=button2=button3=0;
    WrtPortl(SPCR, &SPCRShadow, 0x84);      // Define o port A como output
    WrtPortl (PADR, &PADRShadow, 0x00);      // Envia sinal 0 a todos os bits
    while(1){        // Loop infinito
        button1=BitRdPortl (PBDR, 2);
        button2=BitRdPortl (PBDR, 3);
        if (button1==0){        // Se o botao 1 for pressionado
            BitWrPortl (PADR, &PADRShadow, 1, 0);      // define o sentido
            // horário
            BitWrPortl (PADR, &PADRShadow, 1, 2);      // enable
        }        // if
        if (button2==0){        // Se o botao 2 for pressionado
            BitWrPortl (PADR, &PADRShadow, 0, 0);      // define o sentido
            // anti-horário
            BitWrPortl (PADR, &PADRShadow, 1, 2);      // enable
        }        // if
        button3 = BitRdPortl (PBDR, 4);      // Se o botão 3 for pressionado
        if (button3==0){        // movimenta o motor
            BitWrPortl (PADR, &PADRShadow, 1, 1);
            DELAY();
            BitWrPortl (PADR, &PADRShadow, 0, 1);
            DELAY();
        }        // if
    }        // while
}        // end program
void DELAY(){
    int i;
    for (i=0; i<200; i++);
}        // void delay

```


ANEXO B – DATA-SHEET DO MOTOR DE PASSO

INSTALLATION BULLETIN

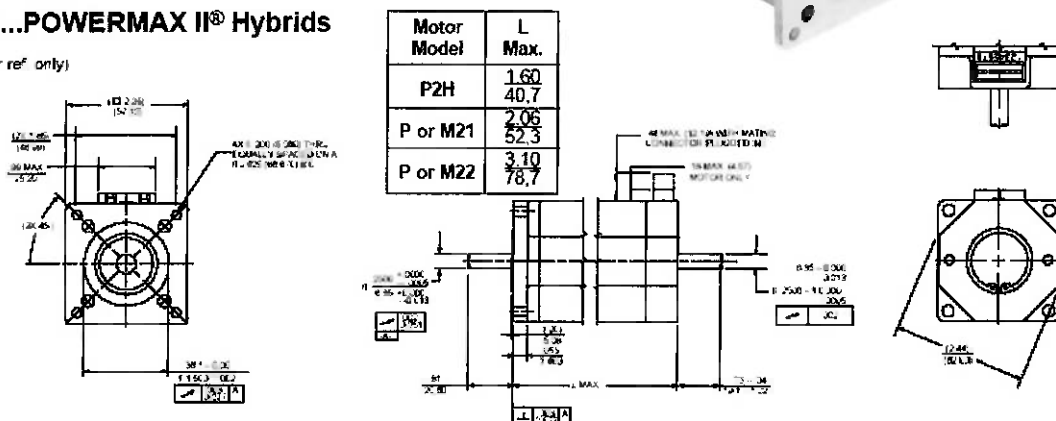
POWERMAX II® Hybrid Step Motors

- Dimensions
- Installation Guidelines
- Connections
- Warranty/Return Authorization
- Encoder Option



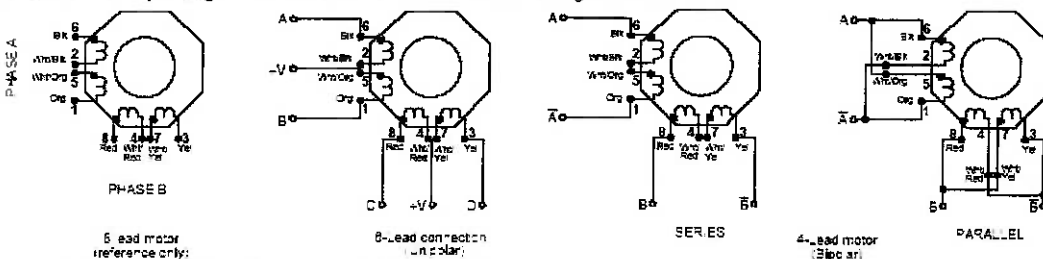
DIMENSIONS...POWERMAX II® Hybrids

in. (metric dim. for ref. only)
mm



CONNECTION INFORMATION...Terminations and phase sequencing

NOTE: Phase sequencing direction of rotation as viewed from mounting end of motor



5-lead motor reference only:				
DRIVER CONNECTION	A	B	C	D
STEP 1	GND	O	GND	O
STEP 2	O	GND	GND	O
STEP 3	O	GND	O	GND
STEP 4	GND	O	O	GND
STEP 1	GND	O	GND	O

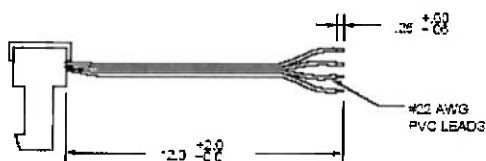
8-lead connection (unipolar):				
DRIVER CONNECTION	A	Ā	B	B̄
STEP 1	+	-	-	+
STEP 2	-	+	-	+
STEP 3	-	+	+	-
STEP 4	+	-	+	-
STEP 1	+	-	-	+

Notes:
 Δ O = off or open
 - = positive current flow
 + = negative current flow
 GND = ground

Optional Flying Lead Connection Information

CONNECTION	LEAD COLOR	DRIVER CONNECTION
4-LEAD BIPOLAR SERIES	BLK	A
	ORG	Ā
	RED	B
	YEL	B̄
	WHT/BLK & WHT/ORG	—
4-LEAD BIPOLAR PARALLEL	BLK & WHT/ORG	A
	ORG & WHT/BLK	Ā
	RED & WHT/YEL	B
8-LEAD UNIPOLAR	YEL & WHT/RED	B
	BLK	A
	ORG	B
	RED	C
	YEL	D
WHT/BLK & WHT/ORG	+V	
WHT/RED & WHT/YEL	+V	

Typical leaded connector (4-lead shown)



... Optional mating connector only

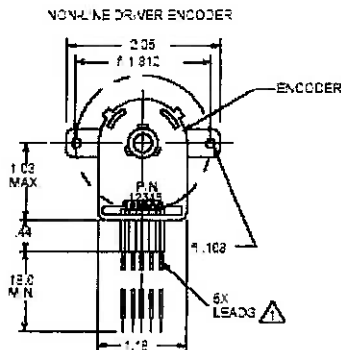
A separate mating connector housing and strain relief cover are available from Pacific Scientific or AMP. The user attaches leads to the connector.

ITEM	PACIFIC SCIENTIFIC	AMP
STANDARD HOUSING	GP00012	641653-8
STANDARD COVER	GP00013	643077-8

NEMA 23 Encoder Option

The standard encoder offered on the NEMA 23 motor is the Agilent Technologies HEDS 5600 series.

PIN	COLOR	FUNCTION
1	BLACK	GROUND
2	BLUE	Z
3	WHITE	A
4	RED	-5V
5	BROWN	B



ENCODER OUTPUT
FOR CW DIRECTION OF ROTATION WHEN
VIEWED FROM MOTOR DRIVE SHAFT END



△ Leads are terminated with Agilent Technologies HEDS-8903 connector.

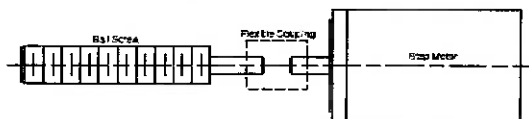
Installing the motor

1. Mounting

- Mount the motor tightly against a metal surface with good thermal conductivity, such as aluminum or steel.
- Secure the motor firmly using hexagonal socket screws and nuts or an equivalent method.

2. Alignment of the load

- When connecting the load to the shaft, assure that the longitudinal axes of both load and shaft are aligned. Use of a flexible coupling or similar device is recommended.



- When machining the motor shaft, or connecting it to a pulley or other device, do not subject to shaft to a thrust load, overhanging load or shock.

CAUTION

- Do not disassemble the motor, drop it or subject it to shock
 - Disassembly results in a considerable reduction in motor performance. Dropping it or subjecting it to shock may cause internal damage. Any of the above conditions may void the warranty.
- Do not subject the motor to any of the following conditions:
 - Locations where strong vibrations or shock occur
 - Dusty locations
 - Locations where water, oil or other liquids are likely to come in contact with the motor
 - Locations where the ambient temperature is outside the permissible temperature range of -20°C (-4°F) to +40°C (+104°F)
- Temperature rise
 - The temperature rise of the motor's outer surface should not exceed +100°C (+212°F). Note that operating the motor with a constant-current driver can lead to a sharp rise in temperature under certain drive conditions. Employ forced-air cooling if the temperature exceeds +100°C (+212°F).

Warranty Policy / Return Authorization

1. Pacific Scientific warrants motor to be free from defects in material and workmanship for two years from the date of manufacture as determined by the date code on the product label. The warranty does not include damage resulting from misapplication, or damage resulting from abuse, overload or overheat conditions, or from failure to provide adequate maintenance.

2. Prior to returning any products for repair, authorization must first be received from the Pacific Scientific Customer Response Center (Phone 815-226-3100, Fax 815-226-3124). The Customer Response Center will issue a Return Material Authorization number which must be referenced on the packing slip and on the outside of the shipping container of the returned product(s). Returns without a valid Return Material Authorization number will not be accepted.

4301 Kishwaukee Street
P.O. Box 106
Rockford, IL 61105-0106
(815) 226-3100
Fax (815) 226-3080
www.pacsci.com