

ERICK WAKAMOTO TAKARABE
RAMON VIEIRA CANALES

nota final 9.2
(note e olá)



BANCADA DE TESTES PARA INSPEÇÃO DE DUTOS POR
ULTRA-SOM

TRABALHO DE FORMATURA
APRESENTADO À ESCOLA
POLITÉCNICA PARA OBTENÇÃO DO
TÍTULO DE ENGENHEIRO

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO:
ENGENHARIA MECATRÔNICA

ORIENTADOR:
PROF. DR. CELSO MASSATOSHI
FURUKAWA
PROF. DR. NEWTON MARUYAMA

SÃO PAULO
2006

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer primeiramente às nossas famílias (pais, mães, irmãos, namoradas, amigos) por ter nos ajudado a resistir a esses 5 anos de faculdade, e também por nos ter agüentado por todos esses anos de vida!

Agradecemos aos orientadores Celso Furukawa e Newton Maruyama pelo apoio moral e ensinamentos durante o período de iniciação científica, e aos colegas de laboratório pelas conversas úteis todo este tempo. Também aos técnicos da oficina pela ajuda neste trabalho.

Não podemos esquecer de agradecer ao YouTube pelos momentos de descontração e de risada durante os últimos dois anos.

Agradecemos a ANP – Agência Nacional do Petróleo pelo apoio financeiro também neste período de iniciação científica.

E por ultimo agradecemos a você que está lendo, ou apenas olhando este documento. Favor não estragá-lo. Deu bastante trabalho fazê-lo!

TF 06
T139b

DEDALUS - Acervo - EPMN



31600012473

FICHA CATALOGRÁFICA

1575295

Takarabe, Erick Wakamoto

**Bancada de testes para inspeção de dutos por ultra-som / E.
W. Takarabe, R.V. Canales. -- São Paulo, 2006.
p.**

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

**1.Mecatrônica 2.Ultrassonografia 3.Processamento digital de
sinais I.Canales, Ramon Vieira II.Universidade de São Paulo.
Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica e
de Sistemas Mecânicos III.t.**

“A risada é realmente..... um grande..... Radar!”

Maria Alice “Tapa na Pantera” Vergueiro

RESUMO

Este trabalho visa o desenvolvimento de uma bancada de testes para inspeções por ultra-som. Nele estão presentes todas as etapas desde a elaboração do projeto, até a construção da máquina. Os conceitos envolvidos em sinais acústicos de ultra-som serão brevemente descritos, e também a teoria envolvida em uma inspeção de dutos por ultra-som. O sistema construído conta com processamento digital de sinais, que se constitui em um avanço com relação à tecnologia de inspeção atual, baseada no processamento analógico de sinais. No caso do sistema desenvolvido, o processamento é feito em tempo real, e implementado em hardware usando FPGA (*Field Programmable Gate Array*), um dispositivo digital configurável de alta capacidade. Desta forma, é possível criar e testar diversos algoritmos de processamento facilmente. No caso deste trabalho, um algoritmo denominado de “detecção por picos” já será implementado. O projeto da máquina é dividido em duas grandes partes: a mecânica e a eletrônica. Na parte mecânica são apresentados os requisitos do projeto, assim como a solução adotada no que diz respeito à estrutura da máquina. Também foi feita uma análise estrutural, visando calcular a frequência natural do sistema, para que fosse possível determinar se a estrutura escolhida não iria ter problemas de vibração durante sua operação. Todos os desenhos de fabricação como os de conjunto estão anexados ao trabalho. Já na parte eletrônica serão descritos os equipamentos que foram utilizados para acionar, aquirir dados, processá-los e controlar o sistema. São apresentados também cálculos para determinar o torque demandado pelo sistema, para que fosse possível selecionar um motor de passo. O funcionamento do sistema é exemplificado com alguns resultados e imagens.

Palavras Chave: Engenharia Mecatrônica. Ultra-som. Inspeção de dutos.

ABSTRACT

This work aims the development of an ultrasonic inspection test bench. It shows all the phases, from the project elaboration, up to the machine construction. Ultrasound acoustic signal concepts are briefly described, along with the theory related to an ultrasonic inspection. The system uses digital signal processing techniques, which is an improvement regarding the current inspection technology, based on analog signal processing. The digital processing is performed in real time, and implemented via application-specific hardware using FPGA (Field Programmable Gate Array), a high capacity configurable digital device. In this way, it is possible to easily implement and test several processing algorithms. In this work, an algorithm named "peak detection" was implemented. The machine project is divided in two main parts: mechanic and electronic. As for the mechanic part, it is presented project requirements such as the adopted solution for the machines structure. A structural analysis was conducted, to calculate the natural frequency of the system, so that was possible to avoid vibration problems. All the fabrication drawings are annexed to the work. As for the electronic part, the equipment used to actuate, acquire and process data, and control the system are presented. It is also presented the calculation of the system demanded torque, used to specify the appropriate stepping motor to actuate the machine. The system operation is exemplified with some results and images.

Keywords: Mecatronic Engineering. Ultra-sound. Pipe inspection.

LISTA DE FIGURAS

Fig 1 - a) Propagação da onda longitudinal e b) Propagação da onda transversal.....	14
Fig 2 - Reflexão e Transmissão de uma onda acústica.....	16
Fig 3 - Ondas de ultra-som sendo enviadas e recebimento de seus ecos, determinando os diferentes TOAs.....	17
Fig 4 - Sinais de eco obtidos em água, (a) gerado por uma placa de alumínio plana e polida; e (b) gerado em região corroída da placa.	17
Fig 5 - Diversas tentativas de detecção do TOA com sinais diferentes.....	20
Fig 6 - Detecção por picos.....	22
Fig 7 - Estrutura escolhida.....	25
Fig 8 - Sistema de movimentação.....	26
Fig 9 - Sistema de suporte	27
Fig 10 - Sistema de suporte	28
Fig 11 - Tanque de ensaio.....	29
Fig 12 - Máquina montada.....	29
Fig 13 - Sistema massa mola.....	30
Fig 14 - Resposta em frequência de um sistema de segunda ordem.....	31
Fig 15 - Análise da frequência natural da estrutura isolada, fornecendo $\omega_n = 172 \text{ Hz}$	32
Fig 16 - Análise da frequência natural da estrutura completa, fornecendo $\omega_n = 30 \text{ Hz}$	33
Fig 17 - Análise da frequência natural da estrutura final, fornecendo $\omega_n = 32,25 \text{ Hz}$	33
Fig 18 - Análise da frequência natural da estrutura final, fornecendo $\omega_n = 29,88 \text{ Hz}$	34
Fig 19 - Momentos de Inércia do conjunto.....	35
Fig 20 - Modelo da mesa de movimentação	36
Fig 21 - Curvas do motor de passo M061 - FD02	37
Fig 22 - Driver do motor de passo.....	40
Fig 23 - Computador padrão PC/104.....	40
Fig 24 - PC/104 e seus periféricos.....	41
Fig 25 - Placa de Aquisição.....	42
Fig 26 - Sistema utilizado nos primeiros ensaios	43
Fig 27 - Corpo de prova utilizado nos testes.....	44
Fig 28 - Sinais com seus respectivos picos detectados	44
Fig 29 - Visão lateral da bancada de testes	45
Fig 30 - Visão frontal da bancada de testes	45
Fig 31 - Visão superior da bancada de testes.....	46
Fig 32 - Tela inicial da rotina em Matlab, com um ponto escolhido.....	47
Fig 33 - Sinal correspondente ao ponto escolhido, com seus respectivos picos detectados	47
Fig 34 - Espessura do corpo de prova (No caso uma chapa de alumínio, colocada entre a posição 18 mm e 75 mm).....	48

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	OBJETIVOS.....	13
3	ULTRA-SOM.....	14
3.1	Os sinais de ultra-som	14
3.2	A reflexão das ondas.....	15
3.3	O TOA (<i>Time of Arrival</i>) e a inspeção por ultra-som	16
4	PROCESSAMENTO DIGITAL DE SINAIS	19
4.1	Deteção por limiar	20
4.2	Processamento digital e a deteção por picos.....	21
5	SISTEMA PROPOSTO	23
5.1	Projeto Mecânico	23
5.1.1	Estrutura	24
5.1.2	Sistema de movimentação	25
5.1.3	Sistema de suporte da peça à ser inspecionada	27
5.1.4	Sistema de suporte e posicionamento dos transdutores	27
5.1.5	Tanque de ensaio	28
5.2	Análise estrutural do equipamento.....	30
5.3	Dimensionamento do motor de passo.....	34
5.4	Encoder	38
5.5	Circuitos eletrônicos	39
5.5.1	Driver de acionamento do motor de passo	39
5.5.2	Computador padrão PC-104	40
5.5.3	Placa de aquisição.....	41
6	TESTES E RESULTADOS	43
6.1	Testes do sistema eletrônico	43
6.2	Testes do Sistema Final.....	44
7	CONCLUSÕES	49
8	REFERÊNCIAS.....	50
	ANEXO A.....	52
	ANEXO B.....	67

ANEXO C.....	70
ANEXO D.....	78

1 INTRODUÇÃO

Dutos para o transporte de petróleo são usados há muitos anos em larga escala em todo o mundo. Porém, com o passar dos anos, estes dutos estão sujeitos a sofrer problemas de corrosão, principalmente por estarem em ambientes corrosivos (como no fundo do mar ou expostos ao ar livre) e por transportarem fluídos contendo contaminantes (como água salgada e areia) que tendem a se acumular na seção inferior dos dutos, colaborando para a deterioração dessa região.

A corrosão severa pode acarretar no vazamento de fluídos tóxicos e inflamáveis, colocando em risco a vida de pessoas e danificando gravemente o meio ambiente. As conseqüências destes acidentes levam ao dispêndio de muito dinheiro, seja para consertar os dutos, seja para tentar remediar os danos causados ao meio ambiente.

Para evitar estes acidentes, os dutos devem ser inspecionados periodicamente à procura de regiões danificadas. Porém a inspeção interna de tubulações é uma tarefa complexa e dispendiosa. Em primeiro lugar é desejável que a operação do duto seja minimamente afetada, de modo a evitar prejuízos na produção. Além disso, os diâmetros internos são muito estreitos para que uma pessoa possa fazer a inspeção *in situ*. Por estes motivos é necessária a utilização de equipamentos que possam ser inseridos na tubulação. Equipamentos desse tipo são conhecidos como *pigs instrumentados*.

Estes pigs servem para levar sensores e outros instrumentos pelo interior de tubulações, e são usados já há cerca de 40 anos como ferramentas de detecção de falhas e perdas de metal em oleodutos. De uma geração tecnológica para outra, mais e mais refinamentos vão sendo introduzidos, seja para simplesmente melhorar o resultado das análises ou para acompanhar novas normas de inspeção [6].

Uma forma de se realizar essas inspeções com *pigs* é através de ondas acústicas de alta frequência – o ultra-som. Nesta modalidade, empregam-se os chamados *pigs* ultra-sônicos, que são equipados com transdutores de ultra-som apontados radialmente para a parede interna da tubulação.

O uso de sistemas ultra-sônicos como método de teste não destrutivo é interessante, pois possui algumas vantagens importantes com relação a outras tecnologias, tais como ensaios eletromagnéticos e por raios X. O ultra-som oferece melhor precisão do que as medidas por campo magnético, onde se detectam perdas de material pela variação da relutância da parede do duto. Quando comparado aos testes por raios X, o ultra-som oferece maior facilidade e segurança de operação. O uso de sistemas ultra-sônicos pode, inclusive, ser feito externamente à tubulação. Park [5], por exemplo, apresenta dois tipos de robôs autônomos para a inspeção de espessura de paredes de tubos de caldeiras e tubulações industriais. Estes robôs usam um sistema que mede a propagação do som em seções das paredes do tubo realizando uma inspeção externa do mesmo. Obviamente, esta abordagem somente permitiria a inspeção de trechos descobertos de oleodutos.

A abordagem atual para o problema foi usada por Furukawa [2] no desenvolvimento de um *pig* instrumentado para inspeção de oleodutos. Esta é uma abordagem predominantemente analógica em termos do tratamento do sinal: o momento de chegada do eco é detectado por um circuito de detecção de limiar.

Por outro lado, avanços no sentido de melhorar a detecção do sinal são apresentados por Reber [6], que apresenta uma nova geração de ferramentas de inspeção ultra-sônica de alta resolução para inspeção de oleodutos. Seu trabalho sugere o uso de recursos de redução de dados e comenta o uso ferramentas de software usadas para elaborar o controle do sistema. Identifica a realização de ferramentas de inspeção por ultra-som como sendo as mais desafiadoras em termos de processamento de sinal e sugere, pela menção ao uso de FPGAs no tratamento do sinal recuperado,

uma abordagem digital do problema de determinação do momento de chegada do eco.

O trabalho de Balzer [1], por sua vez, apresenta um pig de alta resolução e grande alcance (menciona distâncias de até 250km), capaz de pesquisar defeitos em toda a circunferência do tubo com uma resolução longitudinal de 3mm à velocidade de 1m/s.

Este pig gera uma grande quantidade de dados que é submetida a um sistema de compressão *on-line* com grandes taxas de compactação, de forma a tornar possível o armazenamento de grandes volumes de dados em memória de estado sólido. Para tanto, o sistema faz uso de um conjunto DSP-FPGA, para pré-tratamento e compactação dos dados. O sistema, no entanto, utiliza um algoritmo para detecção dos picos no sinal digitalizado para determinar o momento de chegada do mesmo.

Trabalhos como os de Suh [8] sugerem que uma abordagem digital para o problema da recepção dos ecos pode trazer mais vantagens. Em seu trabalho, introduz uma maneira para inspeção de parafusos em plantas críticas sem a necessidade de remoção, usando um método de Deconvolução Preditiva Dinâmica, visando melhorar a detecção de rachaduras dos testes convencionais.

Este processo é aplicado para altas frequências (10MHz), e é sugerido o desenvolvimento de um circuito integrado ASIC para aumentar sua velocidade de processamento.

A inspeção de parafusos por ultra-som, assim como a inspeção de paredes de oleodutos, é baseada na determinação do tempo de retorno do eco. O uso da deconvolução preditiva elimina os sinais repetidos originados nas reflexões do sinal original nas diferentes partes do corpo do parafuso. Da mesma forma, haverá reflexões e ruídos que precisarão ser eliminados para a correta detecção do momento de chegada do pulso de eco durante a medição de espessura da parede de um oleoduto.

Outro trabalho que aponta para esta direção é o de Lima [3] [4], que apresenta um sistema de posicionamento acústico baseado no tratamento do sinal com abordagem digital, através de filtros casados implementados

em dispositivo lógico configurável (FPGA). A função do filtro casado é encontrar uma estimativa otimizada para o tempo de chegada do eco, tendo como informação a priori um modelo do sinal esperado.

Em termos matemáticos, um filtro casado pode ser definido como um dispositivo que apresenta uma função de transferência igual ao complexo conjugado do espectro do sinal para o qual ele é “casado” [9].

A abordagem geralmente utilizada para o problema de estimação de um parâmetro determinístico (no caso, o TOA) a partir de observações aleatórias é a estimação de máxima verossimilhança (ML – *Maximum Likelihood*). Se X é a variável que se deseja estimar e u é a grandeza aleatória observada, a estimação de máxima verossimilhança consiste em se encontrar o valor de X que mais provavelmente causou ou produziu o valor de u observado.

Portanto, um receptor capaz de fornecer estimativas de máxima verossimilhança de TOA de um sinal é um sistema linear cuja resposta impulsiva é o sinal conhecido revertido no tempo. Esse receptor é chamado de *filtro casado*. A estimativa do TOA é obtida detectando-se o instante de pico da saída do filtro casado.

Apesar de ter sua aplicação voltada para navegação de robôs submarinos, o método de tratamento de sinal apresentado é uma resposta para o mesmo problema enfrentado na medição de espessura de paredes de tubos: a detecção correta do momento de chegada do sinal.

Faz-se a devida ressalva que o sistema proposto por Lima foi especificado para uma baixa frequência de trabalho (da ordem de 100 KHz) e para propagação do sinal na água, o que significa que não enfrenta condições tão severas de atenuação do meio no sinal.

O presente trabalho, com base nos casos citados, se propõe a estudar a introdução de melhorias no tratamento do sinal de eco recebido pelos transdutores, de forma a melhorar a precisão das medidas realizadas e aumentar a taxa de detecção destes ecos, através da adoção de uma abordagem de processamento digital do sinal recebido.

2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um sistema capaz de realizar a “varredura” de corpos de prova através de ondas de ultra-som. O sistema será desenvolvido do começo ao fim, tanto na parte eletrônica (hardware e software) quanto à mecânica (estrutura do equipamento).

O sistema realizará as varreduras através de transdutores de ultra-som colocados em um suporte que se movimentará longitudinalmente.

A estrutura é responsável por suportar os transdutores, assim como o corpo de prova e todas as partes responsáveis pela movimentação do sistema.

Na parte eletrônica o sistema contará com uma placa conversora A/D para digitalizar os sinais de ultra-som. Com esses sinais digitalizados será possível realizar um processamento digital, de modo a melhorar a detecção dos ecos dos pulsos acústicos. O processamento será feito totalmente por hardware através de uma FPGA (*Field Programmable Gate Array*).

Com um sistema deste tipo será possível estudar novas técnicas para realizar inspeções por ultra-som, já que o sistema será preciso nas varreduras, e a reconstituição acústica dos corpos de prova poderá ser comparada com o formato real destas peças.

Além da construção do sistema será testada uma nova técnica de detecção de ecos conhecida como “detecção por picos”, e esta será avaliada em relação aos resultados que demonstrar, principalmente em comparação a uma técnica já existente e muito utilizada, a de “detecção por limiar”.

3 ULTRA-SOM

3.1 Os sinais de ultra-som

Sinais de ultra-som se comportam como qualquer outro sinal acústico, e por isso podem ter este comportamento muito bem previsto, já que a teoria de propagação acústica é bem consolidada.

Em primeiro lugar, as ondas acústicas podem ser divididas em longitudinais (onde a movimentação de uma partícula é na direção de propagação da onda) e transversais (onde a movimentação das partículas é perpendicular à direção de propagação da onda) [10]. A Fig 1 exemplifica estes dois tipos de propagação. No geral, ondas acústicas acabam sendo uma combinação tanto de ondas transversais quanto longitudinais.

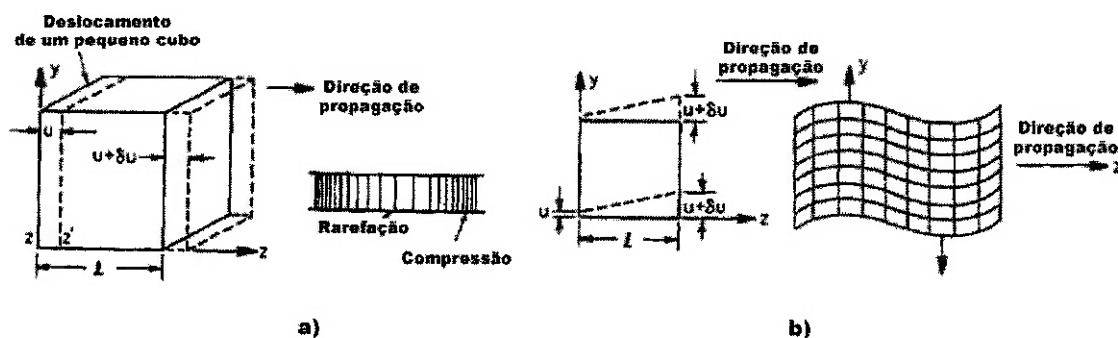


Fig 1 - a) Propagação da onda longitudinal e b) Propagação da onda transversal

Em aplicações específicas, tais como transdutores, a construção do emissor de ondas pode ser feita de maneira que este emita apenas um dos tipos (transversal ou longitudinal).

A propagação de ondas acústicas ocorre devido a pequenos deslocamentos entre partículas consecuentes em um determinado meio. Desta maneira, uma partícula causa o deslocamento de outra, que irá causar

o deslocamento de mais uma, e assim por diante. Assim esses pequenos deslocamentos vão se propagando, fazendo com que a onda se desloque. Devido às propriedades elásticas do meio, os deslocamentos acabam não se dando em apenas uma direção, mas sim indo e voltando, como uma mola, causando o efeito de rarefação e compressão (no caso longitudinal) ou de deslocamento pra cima e pra baixo (no caso transversal).

3.2 A reflexão das ondas

As ondas acústicas se propagam em um meio normalmente até que encontrem uma fronteira, isto é, uma divisão deste meio com outro. A divisão de meios do ponto de vista das ondas ocorre quando há uma mudança na impedância acústica. Assim como temos o conceito de impedância elétrica - a propriedade de um componente impedir mais ou menos a passagem de uma corrente elétrica, em acústica também definimos a impedância de um material como sendo a propriedade que ele possui em transmitir uma vibração acústica com maior ou menor facilidade.

A impedância acústica de um material é definida como o produto da densidade do material pela velocidade das ondas no mesmo.

$$Z = \rho.v$$

A onda, ao encontrar uma diferença de impedâncias será parcialmente refletida e parcialmente transmitida ao outro meio. A Fig 2 exemplifica esta situação.

As frações da onda que serão refletida e transmitida dependem das impedâncias acústicas dos meios (Z_1 e Z_2). O índice de energia refletida R e o de energia transmitida T são expressos por:

$$R = \left[\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right]^2 \text{ e } T = \frac{4Z_2 - Z_1}{(Z_2 + Z_1)^2}$$

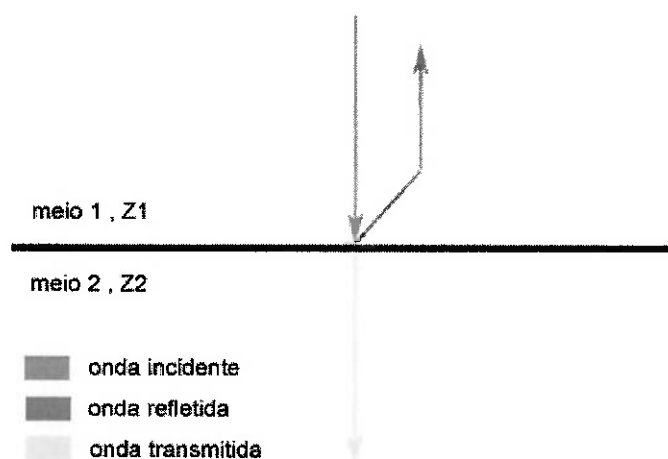


Fig 2 - Reflexão e Transmissão de uma onda acústica

Pode-se perceber que se Z_1 e Z_2 forem muito próximos, praticamente toda a energia será transmitida (como se não houvesse mudança de meio).

Além disso, mesmo que não haja uma troca de meios, as ondas vão perdendo intensidade durante sua propagação devido à expansão da frente de onda, que faz com que a intensidade decaia com o inverso da distância percorrida, e também devido à viscosidade do material.

3.3 O TOA (*Time of Arrival*) e a inspeção por ultra-som

Uma inspeção por ultra-som consiste em levantar o relevo de uma parede ou superfície de um corpo de prova e é feita utilizando-se pulsos acústicos gerados por transdutores de ultra-som, que se refletem nas paredes internas do duto e são recebidas como sinais de eco, pelo mesmo ou por outros transdutores. Conhecendo-se a velocidade da onda no meio, e medindo-se o tempo entre o envio da onda e o recebimento do seu eco (conhecido como TOA, Time of Arrival) é possível determinar a distância entre o transdutor e a parede. Determinando-se estas distâncias seguidamente ao longo de um corpo de prova pode-se reconstruir o relevo do mesmo.

O TOA é determinado com base em um instante do eco recebido, por exemplo, no maior pico do sinal. A Fig 3 mostra um exemplo de envio e recebimento dos ecos gerados pelas paredes, e seus respectivos TOAs.

A propagação de ondas de ultra-som pode ser prevista com acurácia e precisão em líquidos homogêneos e bem conhecidos como a água. Nesses meios, a reflexão das ondas em superfícies metálicas planas e polidas é praticamente especular, gerando sinais de eco intensos e bem comportados. Porém, quando tentamos receber sinais de eco gerados por superfícies corroídas e rugosas, em um meio com alta atenuação, a relação sinal/ruído do eco detectado é fortemente prejudicada.

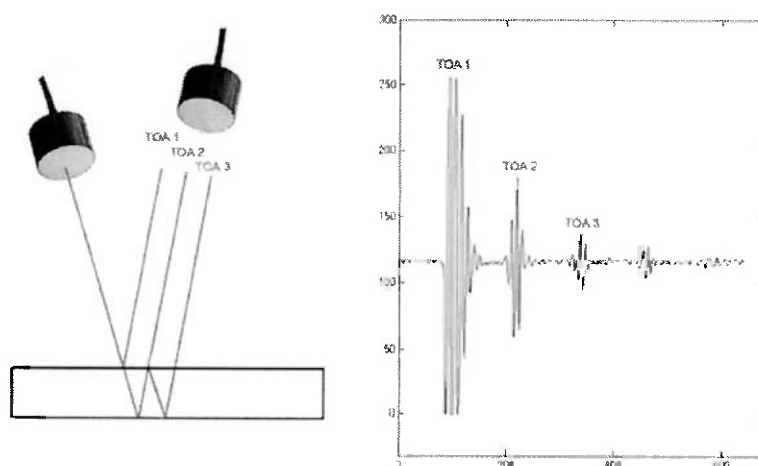


Fig 3 - Ondas de ultra-som sendo enviadas e recebimento de seus ecos, determinando os diferentes TOAs

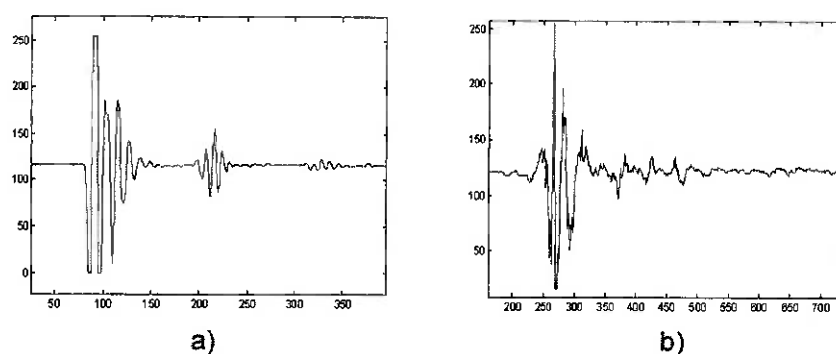


Fig 4 - Sinais de eco obtidos em água, (a) gerado por uma placa de alumínio plana e polida; e (b) gerado em região corroída da placa.

Com estes sinais recebidos de regiões corroídas, ou ainda em meios com maior atenuação (por exemplo, o petróleo) a estimativa do TOA se

torna mais imprecisa, e desta maneira o resultado da inspeção torna-se menos confiável. Daí vem a necessidade do desenvolvimento de técnicas que melhorem a precisão da estimativa do TOA.

4 PROCESSAMENTO DIGITAL DE SINAIS

Quando um sinal é adquirido em uma situação qualquer, é muito provável que ele contenha ruído, ou não esteja em uma forma que permita sua análise direta. Um exemplo básico disso é quando um sinal sonoro é aquisitado e o objetivo é saber que nota musical é aquela (ou seja, a frequência do sinal). Para isso é necessário que se faça um processamento do sinal, através de algoritmos matemáticos. O processamento de sinais consiste na análise e/ou modificação de sinais de forma a extrair informações dos mesmos e/ou torná-los mais apropriados para alguma aplicação específica.

Este processamento pode ser feito tanto analogicamente como digitalmente. A vantagem de um processamento digital de sinais (*digital signal processing, DSP*) é que se podem empregar algoritmos muito mais complexos e eficientes que em um processamento analógico.

O DSP pode ser implementado de diversas maneiras: via software com processadores dedicados, com processadores normais, ou até com circuitos digitais eletrônicos totalmente dedicados.

No caso de inspeção por ultra-som, como a frequência do sinal é relativamente alta (cerca de 5 MHz) é necessário uma conversão analógica/digital muito rápida (cerca de 50 MHz), e além disso, como os percursos de inspeção são longos, a quantidade de dados que deveriam ser guardados é muito grande, logo fica inviável construir um sistema que seja totalmente embarcado. Para resolver este problema é proposto realizar o DSP com um hardware dedicado, isto é, um circuito que trabalhe apenas fazendo o processamento, e em tempo real, de modo a evitar a necessidade de armazenar muitos dados. Para criar circuitos deste tipo pode se utilizar uma FPGA, que é um dispositivo semicondutor programável, no qual podem ser implementados circuitos digitais de elevada complexidade.

Os pigs ultra-sônicos atuais usam uma eletrônica totalmente analógica para a detecção do TOA, que não apresenta resultados totalmente satisfatórios. Ela é conhecida como detecção por limiar.

4.1 Detecção por limiar

A detecção de limiar consiste em determinar um limiar de amplitude para o eco recebido, e considera-se como TOA o instante em que o sinal ultrapassa esse limiar pela primeira vez. Essa técnica é passível de diversos erros. A Fig 5 mostra exemplos de detecções do TOA por limiar. No caso, apenas o exemplo a) pode ser considerado como uma boa estimativa.

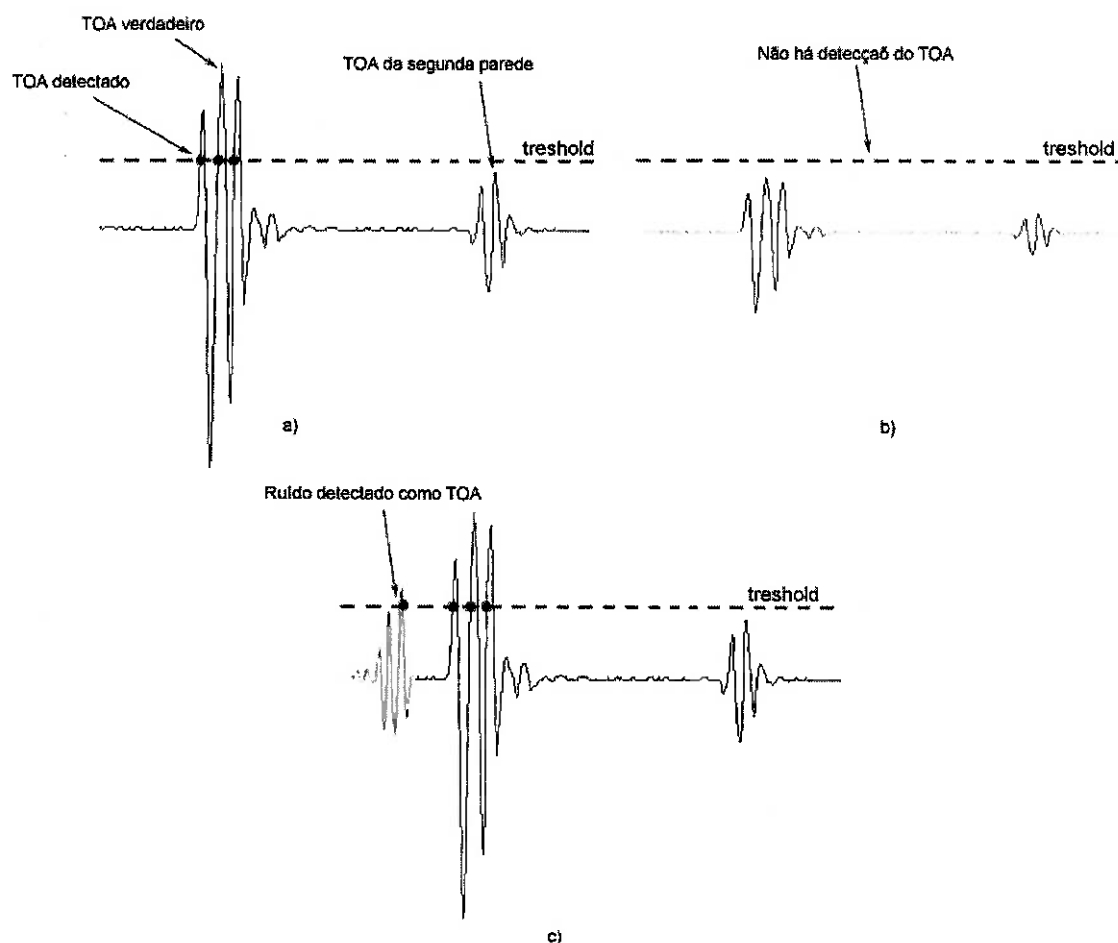


Fig 5 - Diversas tentativas de detecção do TOA com sinais diferentes

Esses erros ocorrem por diversos motivos. O sinal pode estar com muito ruído, a amplitude geral do sinal está baixa (sinal atenuado), e a técnica em si não é boa. Além disso, com esta técnica fica impossível detectar os outros ecos do sinal, e desta maneira não é possível reconstruir toda a espessura do duto, por exemplo, mas apenas ter uma idéia de seu estado através do relevo da primeira parede.

4.2 Processamento digital e a detecção por picos

Como descrito, devido ao uso dos sinais de ultra-som, e a necessidade do processamento em tempo real, foi decidido utilizar um hardware dedicado ao DSP, implementado em uma FPGA.

Com a utilização da FPGA, inúmeros algoritmos podem ser implementados, e assim diversos processamentos podem ser feitos com o sinal.

No caso deste projeto foi desenvolvida uma técnica de detecção por picos, que funciona da seguinte maneira.

O sinal recebido vai sendo analisado em tempo real, e o instante de máxima amplitude do sinal é considerado como a melhor estimativa para o primeiro TOA. Além disso, um timer é programado, para que após este primeiro pico, o sistema ignore uma parte do sinal e comece a procurar por um segundo pico. Este segundo maior pico é considerado como o instante do segundo TOA. A Fig 6 mostra um sinal e os parâmetros envolvidos na configuração desta técnica.

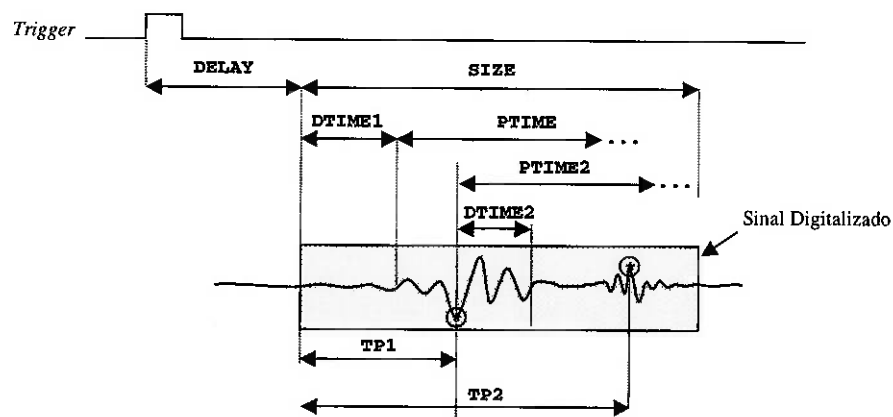


Fig 6 - Detecção por picos

- **DELAY** – Tempo entre um sinal trigger e o começo da aquisição.
- **SIZE** – Quantidade de pontos que serão aquisitados.
- **DTIME1** – Tempo morto para começar a procurar o primeiro pico.
- **DTIME2** – Tempo morto entre a detecção do primeiro pico e o começo da procura pelo segundo.
- **PTIME1** – Tempo de execução do detector do primeiro pico.
- **PTIME2** – Tempo de execução do segundo detector de pico.

Neste caso os pontos indicados por um pequeno círculo indicam o primeiro e o segundo TOA (TP1 e TP2) respectivamente, e assim é possível reconstruir toda a espessura da peça analisada. Por envolver critérios relativos à intensidade do sinal, a detecção por picos tende a fornecer melhores resultados que a detecção por limiar, mesmo que o sinal seja fortemente atenuado e apresente baixas amplitudes.

5 SISTEMA PROPOSTO

O projeto do sistema foi desenvolvido em duas grandes frentes: mecânica (que inclui o projeto da estrutura em si, os desenhos de fabricação, as usinagens e a montagem da bancada) e eletrônica (que inclui o desenvolvimento de todo o circuito eletrônico, acionamento do motor, leitura de encoder e o software que comanda a máquina).

A seguir serão descritos os requisitos e o desenvolvimento de cada uma destas duas frentes. A parte mecânica é subdividida em projeto mecânico e análise estrutural. Já a parte eletrônica é subdividida em dimensionamento do motor de passo, encoder e circuitos eletrônicos.

Todos os desenhos de fabricação, assim como os circuitos eletrônicos estarão nos anexos do trabalho.

5.1 Projeto Mecânico

Para se obter alta precisão, uma máquina precisa reunir quatro requisitos funcionais básicos [11]:

- Deve possuir uma perfeita referência cinemática;
- Deve possuir um perfeito par cinemático que execute um perfeito movimento em concordância com a referência;
- Deve ser construída de maneira a evitar ruídos (ruídos internos: erros no referencial ou no par cinemático introduzidos durante a montagem, calor, etc.; ruídos externos: forças externas, vibrações, calor, etc.) causados pela operação do sistema;
- Deve ser capaz de detectar o movimento com bastante acurácia.

Tendo estes requisitos como meta, o projeto da máquina foi dividido em cinco partes, que, apesar de serem distintas, são dependentes entre si. São elas:

- Estrutura;
- Sistema de movimentação;
- Sistema de suporte da peça à ser inspecionada;
- Sistema de suporte e posicionamento dos transdutores;
- Tanque de ensaio.

5.1.1 Estrutura

Os parâmetros utilizados para se determinar a melhor estrutura foram:

A – Facilidade de construção e montagem. A construção e a montagem foram realizadas nas dependências do Laboratório de Protótipo do Prédio da Engenharia Mecânica da Escola Politécnica, pelos alunos responsáveis por este presente trabalho de formatura, com o auxílio de funcionários deste laboratório. Portanto, devido à inexperiência destes alunos e o tempo limitado de projeto, a estrutura escolhida, de acordo com este quesito, é aquela de mais fácil confecção e montagem, além de permitir a introdução de uma referência cinemática mais próxima da desejada.

B – Volume de trabalho. O volume de trabalho é um parâmetro de projeto especificado pelo tamanho da peça submetida ao ensaio não destrutivo. Como produto de uma reunião entre os envolvidos no projeto, ficou estabelecido que o volume de trabalho ideal para o equipamento seria de $V_{trabalho} = 25l$, com $250mm$ de largura, $500mm$ de comprimento e $200mm$ de altura. Portanto, a estrutura escolhida por este quesito foi aquela que fornece este volume de trabalho, porém sem excedê-lo em demasia, levando em conta as medidas apresentadas.

C – Rigidez. A rigidez é um parâmetro importantíssimo para analisar os efeitos de vibrações, visto que este parâmetro influencia diretamente na resposta em frequência da estrutura. Este parâmetro será mais detalhado na seção 5.2. Mas já adiantando, a estrutura pode ser observada na Fig 7.

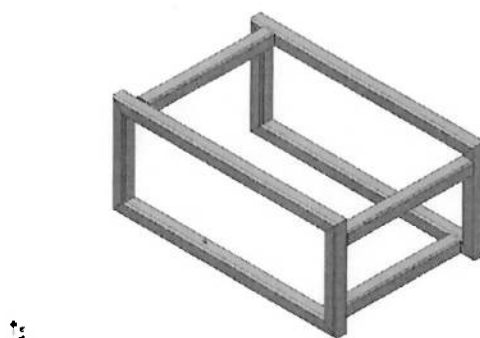


Fig 7 - Estrutura escolhida

5.1.2 Sistema de movimentação

O sistema de movimentação é constituído por: mancais, motor de passo, polias e correias sincronizadoras, e guias lineares.

Os mancais (SY 20TF SKF) dos eixos foram escolhidos através do catálogo da SKF Brasil, SP, levando-se em conta a baixa rotação dos eixos e a baixa carga sobre os mesmos (somente o peso do sistema de suporte e posicionamento dos transdutores, que é em torno de $2,4\text{ kg}$, obtido através do software Autodesk Inventor).

Devido à baixa velocidade de operação, a melhor opção para o acionamento do equipamento é o motor de passo. Isto porque o controle do mesmo é possível de ser implementado em malha aberta, sendo de mais fácil aplicação, mas não perdendo a precisão.

A transmissão é feita através de polias e correias sincronizadoras, devido ao percurso relativamente longo, a necessidade de precisão e a baixa velocidade de operação.

O acoplamento entre as polias e os eixos é feito por encaixe justo auxiliado por parafusos de fixação.

As polias são acopladas nos próprios eixos do encoder e do motor de passo através de encaixe justo auxiliado por parafusos de fixação.

Sabendo disto, a escolha das polias foi feita através de catálogos, tendo como parâmetros de entrada os diâmetros dos eixos nos quais elas serão presas. Já as correias foram escolhidas de acordo com as polias e com a baixa carga envolvida.

As correias do motor e do encoder são do modelo 172 L 050 fechadas. Seus tensionamentos serão fornecidos pela movimentação dos suportes do encoder e do motor. As correias de tração do carro são do modelo L100 aberta. Por serem abertas, elas serão, primeiramente, tensionadas e depois presas ao carro.

Para os eixos, foram escolhidos tubos de aço inox por apresentarem boa relação custo/benefício.

Para a movimentação linear foram escolhidas as seguintes peças fornecidas pela Mitay Ltda. (Cotia, SP): guias lineares compostas por trilhos T12, eixos D12H6 e suportes SLA12. A escolha foi concretizada através de catálogos, utilizando como parâmetros de entrada a carga e o comprimento exigidos.

O sistema de movimentação pode ser visto na Fig 8.

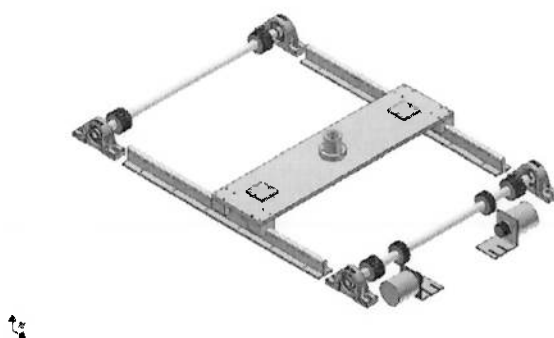


Fig 8 - Sistema de movimentação

5.1.3 Sistema de suporte da peça à ser inspecionada

Para o projeto deste sistema, levou-se em conta a necessidade da repetibilidade do posicionamento da peça, isto é, ela ser removida do equipamento e poder ser realocada na mesma posição, em relação aos transdutores. Por isso foi decidido fixar o sistema na estrutura e não no fundo do tanque de ensaio. Esta decisão influi positivamente no requisito de uma boa referência cinemática.

A fixação se dá através de duas hastes em forma de “U”, unidas pela própria mesa do suporte. Esta configuração foi obtida através de inúmeras modelagens através do MEF (método de elementos finitos), como será mostrado na seção 5.2, para garantir a sua rigidez.

A altura correspondente também levou em conta o volume de trabalho exigido.

Um outro ponto relevante é o fato deste sistema se encontrar praticamente todo imerso em água. Por isso foram escolhidos materiais resistentes à esse meio agressivo: as hastes foram feitas com aço inox e a mesa com alumínio.

O sistema de suporte pode ser visto na Fig 9.

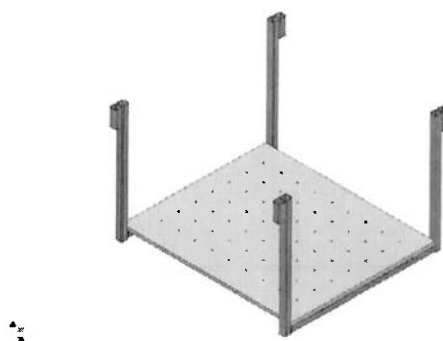


Fig 9 - Sistema de suporte

5.1.4 Sistema de suporte e posicionamento dos transdutores

A primeira decisão de projeto sobre este sistema foi com relação à haste de sustentação vertical (altura) dos transdutores em relação à peça.

Foi escolhido para esta função um tubo de aço inox de 25mm de diâmetro e 315mm de comprimento, com um rasgo de 5mm de largura. Com isso consegue-se atingir o volume de trabalho; evitar a corrosão da haste; facilitar a montagem, visto que se trata de somente um eixo para alinhar com o plano do carro de transporte; dar a rigidez necessária; e manter o alinhamento na direção e avanço. Esta decisão também influi positivamente no requisito de uma boa referência cinemática.

A fixação dos transdutores é feita por encaixe justo em uma peça de nylon, travando-os em suas respectivas posições, porém sem causar danos nos mesmos.

O sistema de suporte pode ser visto na Fig 10.

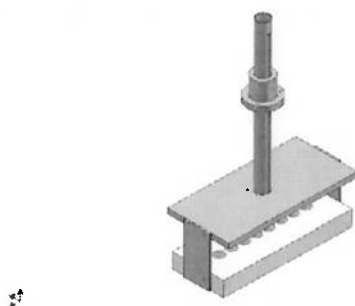


Fig 10 - Sistema de suporte

5.1.5 Tanque de ensaio

O tanque de ensaio deve ser resistente para agüentar a pressão interna e choques acidentais em suas paredes, além de permitir a submersão de todo volume de trabalho. Por isso foi escolhido um tanque de acrílico, de dimensões 490mm de largura, 630mm de comprimento, 300mm de altura e 10mm de espessura, como mostrado na Fig 11.

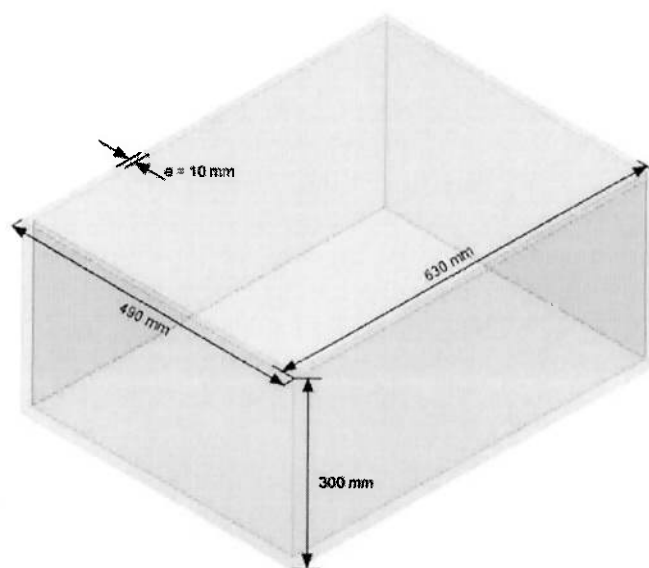


Fig 11 - Tanque de ensaio

A máquina montada pode ser vista na Fig 12.

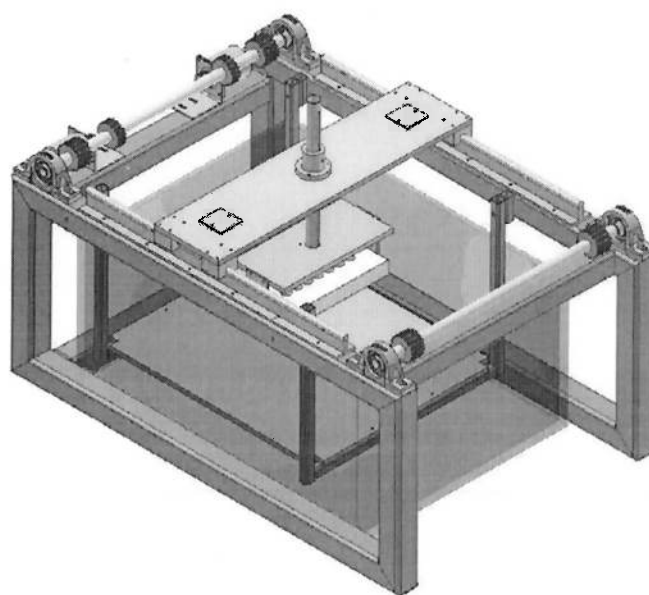


Fig 12 - Máquina montada

5.2 Análise estrutural do equipamento

A análise estrutural do equipamento visou à obtenção de uma estrutura suficientemente rígida para evitar problemas de vibrações.

A estrutura pode ser modelada através de um sistema segunda ordem com rigidez k , amortecimento c e massa M , como visto na Fig 13 [12].

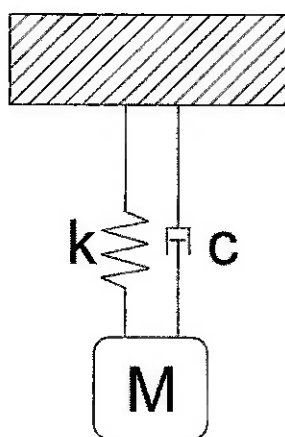


Fig 13 - Sistema massa mola

Assim sendo, a equação que modela este sistema é dado pela Equação (1) [13].

$$M\ddot{x} + c\dot{x} + kx = \text{Força de Excitação}, \quad (1)$$

que fornece uma função de transferência dada pela Equação (2).

$$G(j\omega) = \frac{1}{1 + 2\zeta \left(j \frac{\omega}{\omega_n} \right) + \left(j \frac{\omega}{\omega_n} \right)^2}, \quad (2)$$

onde o coeficiente de amortecimento é dado pela Equação (3) e a frequência natural é dada pela Equação (4).

$$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{M.k}}. \quad (3)$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{M}}. \quad (4)$$

Aplicando este modelamento no software MatLab, é obtido o diagrama de Bode, e assim a resposta em freqüência do sistema é dada pela Fig 14.

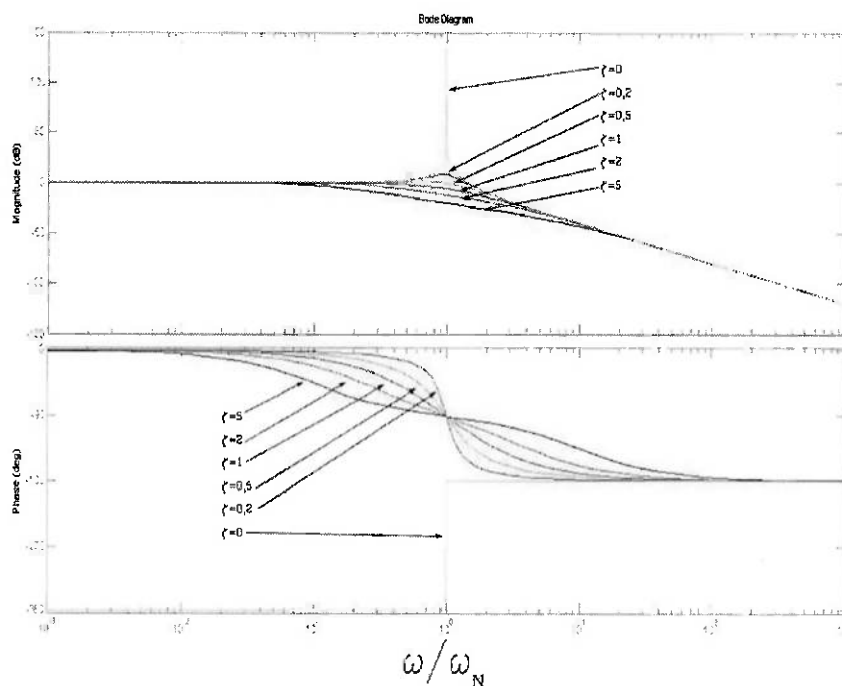


Fig 14 - Resposta em freqüência de um sistema de segunda ordem

Com esta análise, é possível verificar que o sistema (dependendo do coeficiente de amortecimento), quando excitado na sua freqüência natural, vibra com maiores amplitudes.

Para a análise, primeiramente foram identificadas as principais fontes de vibração: o sistema de movimentação dos transdutores (motor de passo, as polias sincronizadoras, as correias, rolamentos, eixo, mancais, etc), além de excitações externas, como as vibrações existentes no próprio local de operação.

Visto que se tratam de várias fontes de excitação, a determinação da freqüência e da amplitude de excitação total pelo método analítico fica prejudicada.

Com isso, buscou-se outra forma de se obter a frequência natural do equipamento para se evitar os efeitos de vibrações.

Para este tipo de equipamento, estipulou-se um valor de 30 Hz para a dada frequência, referente ao primeiro modo de vibrar.

Para a estimativa deste valor, foram levados em consideração a não existência de forças resistentes ao movimento, além das forças inerciais; e o acionamento por motor de passo. As frequências de máquinas ferramentas são em torno de 50 Hz, e como neste caso não existem esforços de corte, o valor de 30 Hz é apropriado.

A partir deste valor foram criados e analisados modelos de estruturas. Para o modelamento foi utilizado o software Autodesk Inventor com a ferramenta ANSYS para análise através do MEF (método dos elementos finitos).

Para a obtenção da estrutura ideal, foi utilizado o método em espiral, ou seja, a estrutura é modelada, analisada e remodelada, entrando em um ciclo até se chegue no objetivo visado. Alguns resultados parciais podem ser vistos nas Fig 15, Fig 16 e Fig 17.

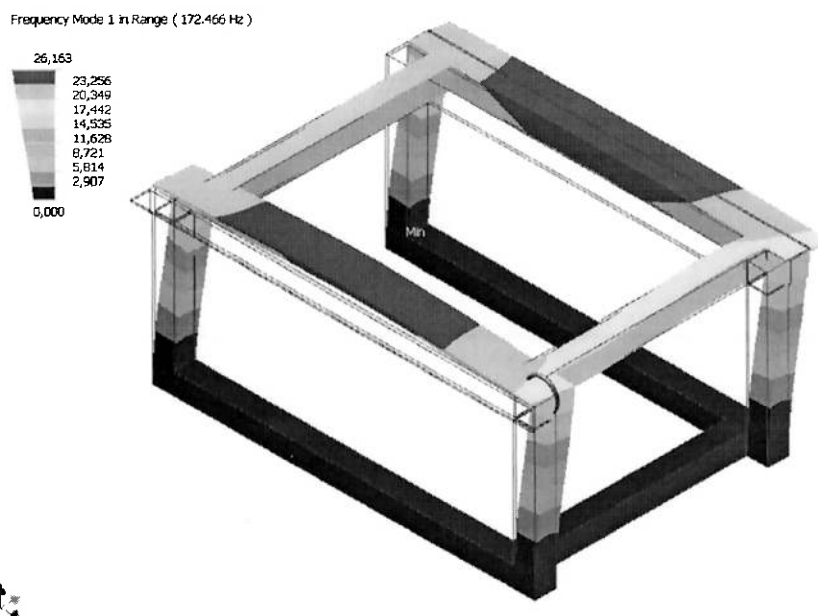


Fig 15 - Análise da frequência natural da estrutura isolada, fornecendo $\omega_n = 172 \text{ Hz}$.

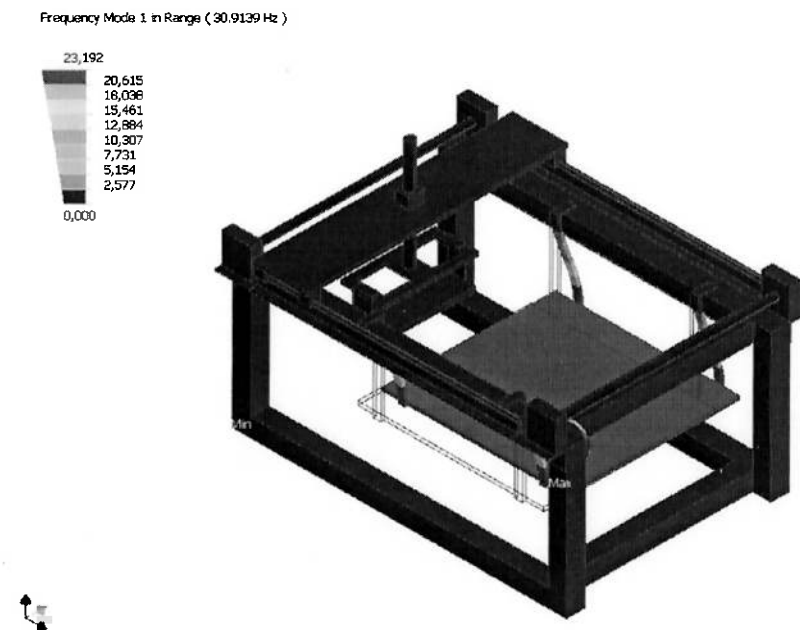


Fig 16 - Análise da frequência natural da estrutura completa, fornecendo $\omega_n = 30 \text{ Hz}$.

O resultado dos ciclos de modelamento, análise e remodelamento é estrutura final demonstrada na figura XX, onde o primeiro modo de vibrar é dado por $\omega_n = 32,25 \text{ Hz}$.

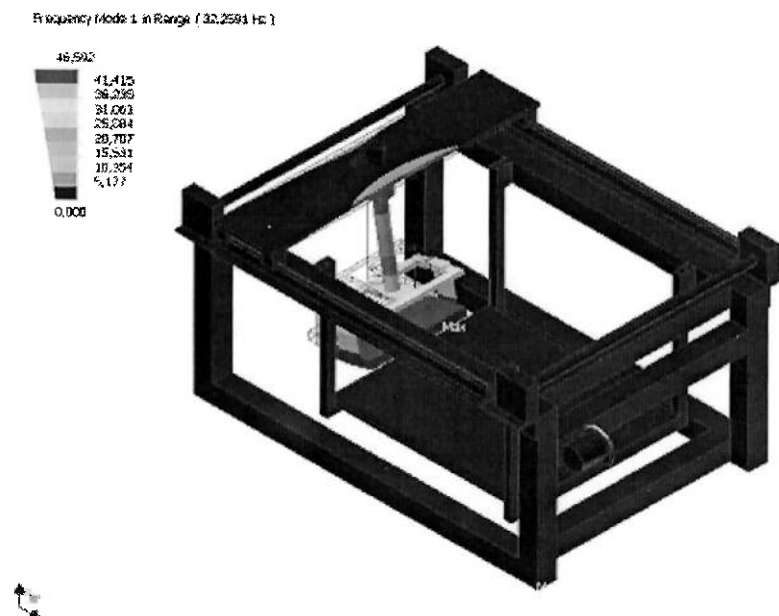


Fig 17 - Análise da frequência natural da estrutura final, fornecendo $\omega_n = 32,25 \text{ Hz}$.

A estrutura é ainda analisada com uma peça de aproximadamente 33 kg sobre a mesa. Com isso a análise fornece o primeiro modo de vibrar do conjunto equivalente à $\omega_n = 29,88\text{ Hz}$. Isto pode ser comprovado através da Fig 18.

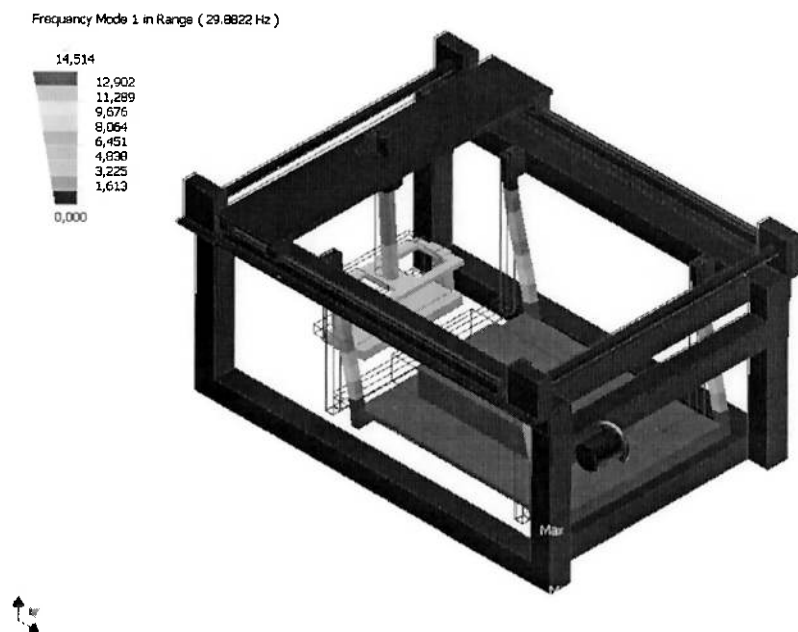


Fig 18 - Análise da freqüência natural da estrutura final, fornecendo $\omega_n = 29,88\text{ Hz}$

Portanto, através destes resultados chegou-se a melhor configuração para a estrutura, em relação aos modos de vibração.

5.3 Dimensionamento do motor de passo

Cabe salientar que a escolha do motor de passo foi feita devido à fácil implementação do controle em malha aberta e sua precisão, além de não serem exigidas altas velocidades do equipamento.

Seu dimensionamento é feito através das curvas de *pull-in* e *pull-out* (dadas em catálogo), que fornecem os torques máximos no eixo do motor em função da rotação. Portanto são necessários o torque e a rotação máximos.

Para obtenção destes parâmetros, foram considerados os momentos de inércia demonstrados na Fig 19. Os valores numéricos foram obtidos através do software Autodesk Inventor, usado para confecção dos desenhos do protótipo.

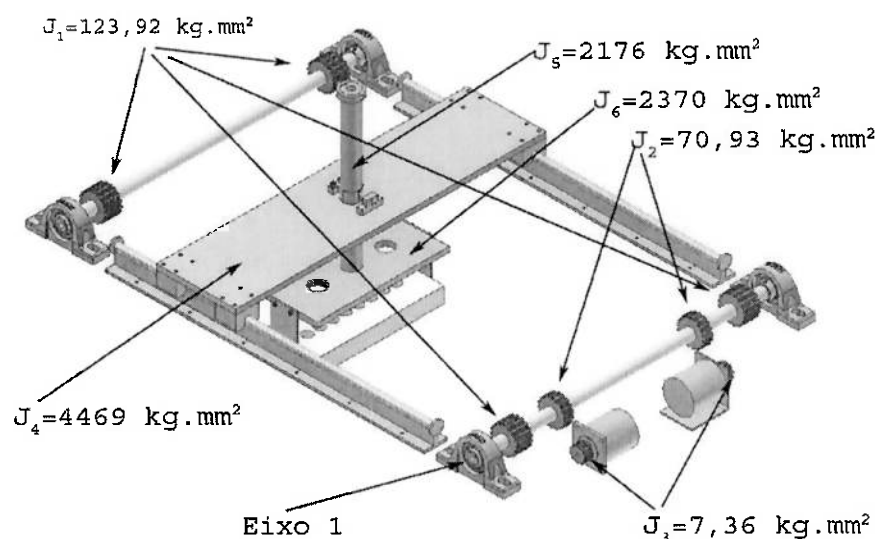


Fig 19 - Momentos de Inércia do conjunto

Pode-se observar que foram desconsideradas as inércias dos eixos, do encoder e do motor, além das perdas por atrito, visto que são, relativamente, muito pequenas.

Primeiramente é necessário fazer o transporte das inércias para um mesmo eixo de referência. A princípio, é escolhido o eixo onde se encontram as quatro polias (Eixo 1). Assim, tem-se que:

$$J_{eixo1} = 4 \times J_1 + 2 \times J_2 + \left(\frac{D_2}{D_3} \right)^2 \times J_3 + J_4 + J_5 + J_6,$$

onde:

$J_1 \rightarrow$ Momento de inércia da polia 17L100

$J_2 \rightarrow$ Momento de inércia da polia 17L50

$J_3 \rightarrow$ Momento de inércia da polia 10L50

$J_4 \rightarrow$ Momento de inércia do Carro

$J_5 \rightarrow$ Momento de inércia do Eixo – Suporte dos transdutores

$J_6 \rightarrow$ Momento de inércia do Suporte dos transdutores

$D_2 \rightarrow$ Diâmetro da polia 17L50=51,54 mm

$D_3 \rightarrow$ Diâmetro da polia 10L50=30,33 mm

Isto indica que $J_{eixo1} \cong 9674 \text{ kg.mm}^2$.

Agora esta inércia é transferida para o eixo do motor através de:

$$J_{motor} = J_3 + \left(\frac{D_3}{D_2} \right)^2 J_{eixo1}$$

Portanto, $J_{eixo\ motor} \cong 3358 \text{ kg.mm}^2 = 3,358 \times 10^{-3} \text{ kg.m}^2$.

O próximo passo é obter a rotação (velocidade angular) e a aceleração angular. O modelo utilizado é mostrado na Fig 20.

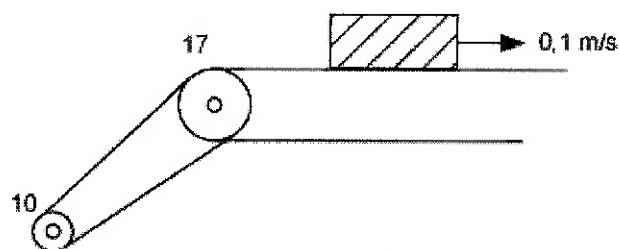


Fig 20 - Modelo da mesa de movimentação

Para isso, consideram-se os parâmetros de projeto:

Velocidade máxima de operação: $V_{máxima} = 0,1 \text{ m/s}$;

Tempo para atingir a velocidade máxima a partir do repouso: $t_{aceleração} = 0,5 \text{ s}$.

A velocidade angular máxima do Eixo 1 é dado por:

$$\omega_{1-m\acute{a}xima} = \frac{2.V_{m\acute{a}xima}}{D_2} \cong 3,88 \text{ rad/s}.$$

A velocidade angular máxima do motor é dado por:

$$\omega_{2-m\acute{a}xima} = \frac{\omega_{1-m\acute{a}xima} \cdot D_3}{D_2} \cong 6,59 \text{ rad/s}$$

A aceleração angular máxima do motor é dada por:

$$\alpha_{2-m\acute{a}xima} = \frac{\omega_{2-m\acute{a}xima}}{t_{acelera\grave{c}\tilde{o}}} \cong 13,18 \text{ rad/s}^2$$

Portanto, o torque máximo do motor é dado por:

$$T_{motor-m\acute{a}ximo} = J_{motor} \times \alpha_{2-m\acute{a}xima} \cong 44,3 \times 10^{-3} \text{ N.m}.$$

Portanto, com estes valores de torque e velocidade angular, e com as curvas de *pull-in* e *pull-out* é possível escolher o motor mais adequado para o equipamento.

A Fig 21 mostra as curvas de *pull-in* e *pull-out* do motor escolhido. Este motor é um *Superior Electric* modelo M061 – FD02 e estava disponível na Escola Politécnica.

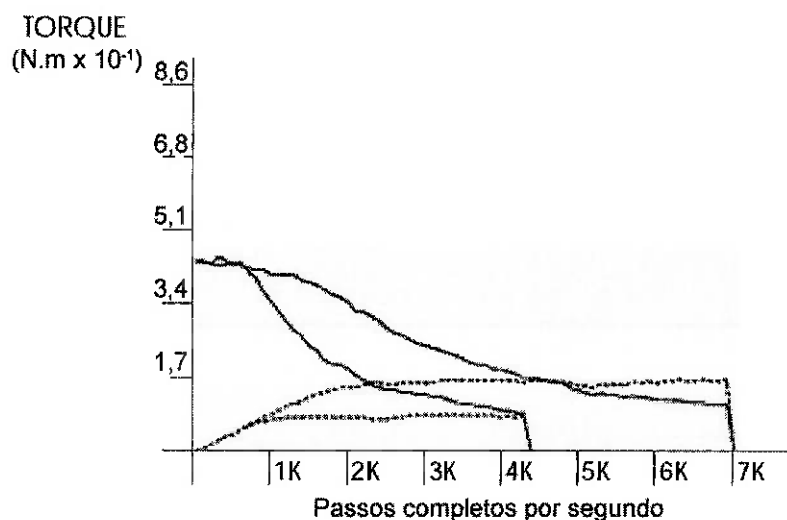


Fig 21 - Curvas do motor de passo M061 - FD02

De acordo com os cálculos, a velocidade máxima do motor será de 6,59 rad/s, e isso equivale a 210 passos/s. A essa velocidade o

torque disponível é de aproximadamente 0,4 N.m, valor muito superior ao que necessitamos, que é de 0,044 N.m. Desta maneira o motor é totalmente apropriado para ser usado neste projeto.

5.4 Encoder

Como foi dito, o uso do motor de passo faz com que não seja necessário utilizar um encoder, pois o motor pode trabalhar em malha aberta. Porém, neste projeto foi decidida a utilização do mesmo, basicamente por dois motivos:

- (a) Caso aconteça alguma anomalia durante o funcionamento do sistema, e o torque demandado ultrapasse rapidamente o torque fornecido pelo motor de passo, este perderá o passo, e não será possível detectar esta perda, o que ocasionará resultados incorretos no final da inspeção.
- (b) Como o objetivo do sistema é realizar estudos para melhorar os *pigs ultra-sônicos* pretende-se realizar também inspeções sem o uso do motor de passo, mas com movimentação manual. A movimentação manual simulará melhor o movimento imprevisível de um *pig* em uma tubulação. E para que seja possível controlar a posição da varredura, é necessário o uso do encoder.

Desta maneira foi decidido acoplar um encoder da mesma maneira que foi acoplado o motor de passo (com correias e polias, ligadas ao eixo principal de rotação). A posição do encoder, assim como a do motor, pode ser vista na Fig 19, que mostra todo o sistema de movimentação.

O encoder foi escolhido com base na resolução máxima que o sistema terá. As varreduras com o motor de passo têm uma resolução máxima de 0,47mm. Para a varredura manual foi escolhida uma resolução máxima de 0,1mm que já é o suficiente para o tipo de inspeção desejada.

Para essa resolução, o encoder deve ter 1000 pulsos por volta. Assim foi adquirido um encoder com 1000 pulsos por volta, com dois canais defasados de 90 graus (para que seja possível fazer uma detecção de quadratura). O *datasheet* do encoder pode ser encontrado no ANEXO B.

A detecção de quadratura com duas fases serve para que seja possível saber em que direção o encoder esta rodando, além de aumentar a resolução do sistema (transformando os 1000 pulsos em 2000, ou até 4000).

Neste projeto a detecção de quadratura, assim como todo o circuito que cuida de contar os pulsos do encoder, e disparar o trigger quando necessário foram desenvolvidos em VHDL e implementados na FPGA da placa eletrônica de aquisição, descrita a seguir.

5.5 Circuitos eletrônicos

Os circuitos eletrônicos deste sistema consistem basicamente em uma placa de aquisição que conta com uma FPGA, um driver para acionamento do motor de passo e um computador padrão PC-104, no qual ficara residente o software que controlará todo o sistema.

5.5.1 Driver de acionamento do motor de passo

Este driver serve para transformar um pulso enviado em nível TTL (5 Volts) em um passo no motor de passo. O circuito conta com CI's próprios para acionamento de motor de passo, e CI's de potencia, de modo a fornecer a potência necessária para o funcionamento do motor.

A Fig 22 mostra o driver. O seu manual e seu esquema elétrico podem ser encontrados no ANEXO C.

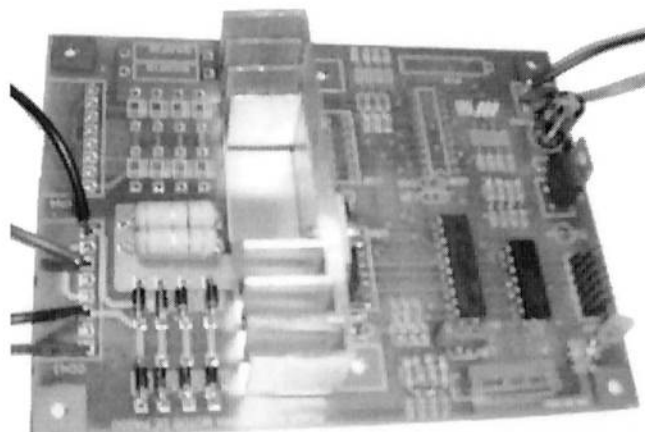


Fig 22 - Driver do motor de passo

5.5.2 Computador padrão PC-104

O PC-104 é um padrão para computadores utilizados em sistemas embarcados, que define tanto a forma, quanto um barramento de computador. Ele é muito utilizado em aplicações que necessitam de aquisição de sinais confiável. O barramento é do tipo ISA com 104 pinos.

O computador padrão PC-104 utilizado conta com todas as funcionalidades de um PC normal, porém com tamanho reduzido. A Fig 23 mostra esse computador, e a Fig 24 mostra o computador montado com seus periféricos (Fonte, Disco Rígido, etc.).

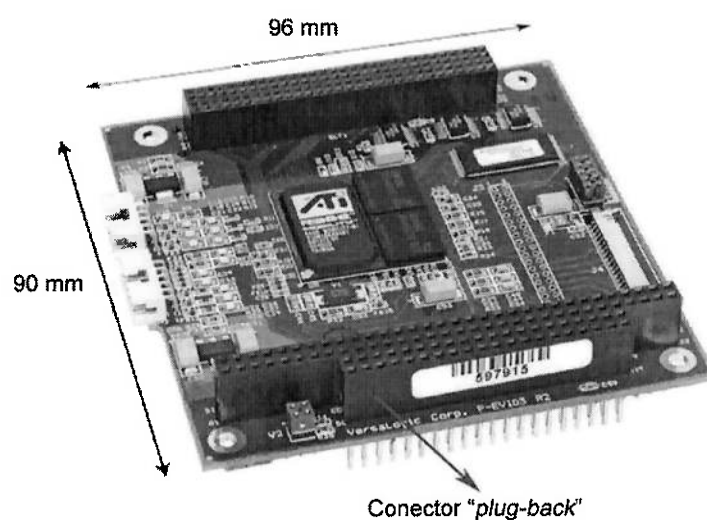


Fig 23 - Computador padrão PC/104

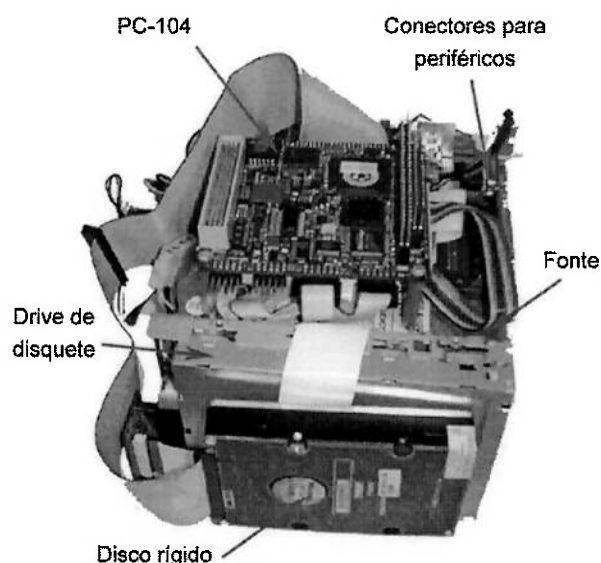


Fig 24 - PC/104 e seus periféricos

Este computador se conecta diretamente com a placa de aquisição através do barramento ISA, recebendo as informações enviadas pela mesma. Neste PC irá rodar o software que controla a aquisição de sinais, o motor de passo, e salva as informações necessárias capturadas durante a inspeção.

5.5.3 Placa de aquisição

A placa de aquisição utilizada neste projeto foi desenvolvida na própria Escola Politécnica, como parte do projeto de *pigs* ultra-sônicos, e gentilmente cedida para este projeto.

As especificações elétricas da placa são as seguintes:

- Taxa de Amostragem: 50 ou 100 MHz.
- Resolução: 8 bits.
- Número de Canais: 8 entradas, divididas em 2 bancos de 4 entradas, com aquisição simultânea de 2 canais (1 de cada banco).
- Impedância de entrada: 50 Ohms.

- Tensão de entrada para fundo de escala: 2 Volts pico a pico, acoplamento CC.
- Memória de aquisição: até 8192 amostras por canal, 8 bits por amostra.
- Tempo de aquisição: 163 μ s (50 MHz) ou 82 μ s (100 MHz).

A Fig 25 mostra a placa de aquisição:

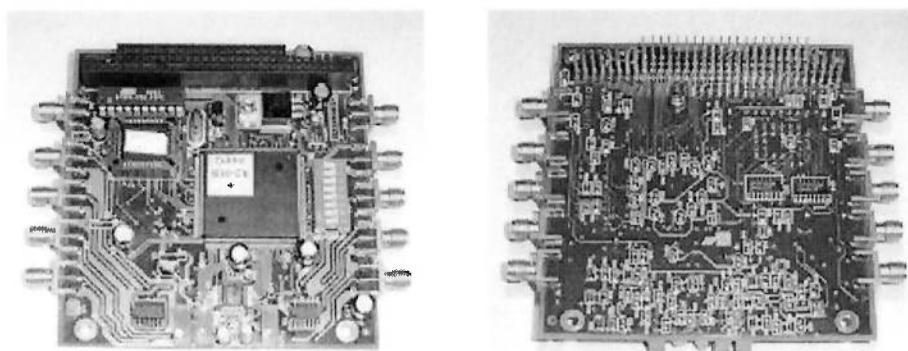


Fig 25 - Placa de Aquisição

A taxa de conversão de 50 Amostras/s é suficiente para aplicações utilizando ultra-som. Além disso, a possibilidade de se utilizar até 8 transdutores de ultra-som, sendo que o sinal de dois estão sempre sendo adquiridos ao mesmo tempo se mostra uma boa opção para o projeto.

Além da parte analógica, essa placa conta com a FPGA na qual foram implementados todos os circuitos com os algoritmos de detecção, e também os circuitos de leitura do encoder. A placa também conta com um barramento ISA compatível com PC-104.

O manual da placa, que descreve também as funcionalidades implementadas na FPGA, pode ser encontrado no ANEXO D.

6 TESTES E RESULTADOS

Esta seção será dividida em duas partes: Testes do sistema eletrônico com um sistema mecânico a parte, e teste do sistema final.

6.1 Testes do sistema eletrônico

Os testes da parte eletrônica com outro sistema mecânico foram feitos para que não fosse necessário esperar a bancada estar pronta para começar o desenvolvimento dos circuitos eletrônicos.

Este sistema mecânico é composto basicamente de um tanque de acrílico e um sistema de suporte para os transdutores. A movimentação foi feita de forma manual, com o objetivo de testar se o hardware e o software funcionavam. A Fig 26 mostra o sistema utilizado. E a Fig 27 mostra o corpo de prova que foi inspecionado.

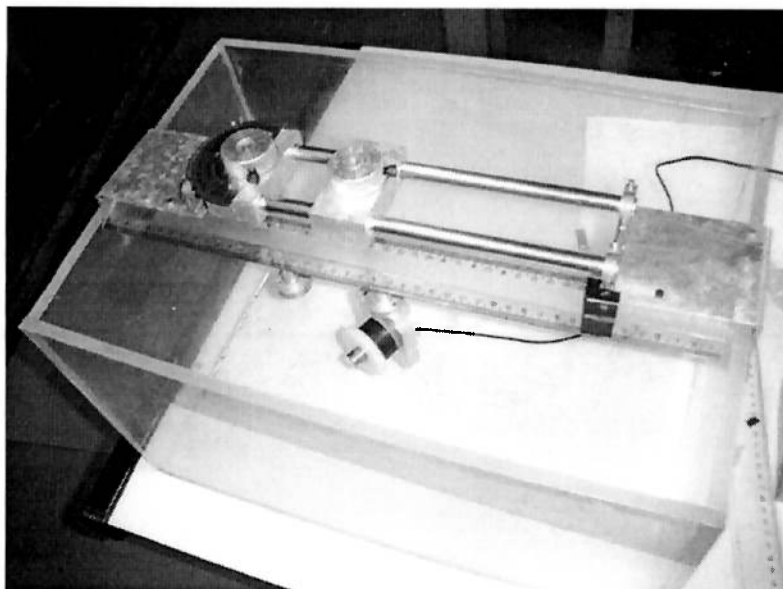


Fig 26 - Sistema utilizado nos primeiros ensaios

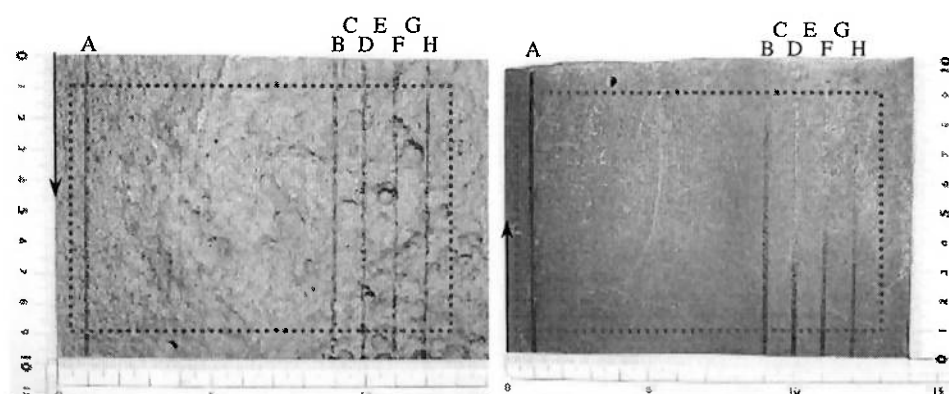


Fig 27 - Corpo de prova utilizado nos testes

Diversos testes foram realizados com este sistema. Um software inicial foi desenvolvido (ainda sem o controle para o motor de passo e leitura do encoder), que já fazia a aquisição dos sinais e salvava as informações necessárias. Também nestes testes já foi desenvolvido e implementado o algoritmo de detecção de picos na FPGA. A Fig 28 mostra dois sinais adquiridos, e seus respectivos picos detectados pelo sistema.

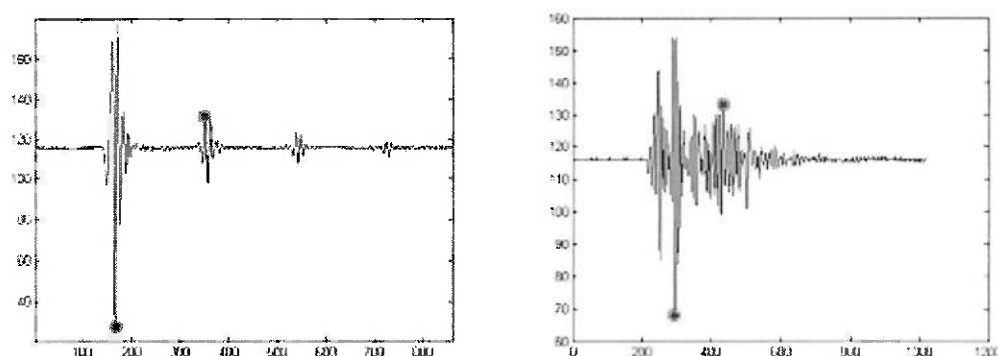


Fig 28 - Sinais com seus respectivos picos detectados

Com este sistema foi possível então desenvolver praticamente todo o hardware e software necessário para o projeto. Apenas algumas mudanças foram necessárias para que se chegasse à versão final para o sistema.

6.2 Testes do Sistema Final

Depois do sistema estar totalmente finalizado, foram feitos alguns testes para a validação do mesmo. Foram incluídos testes do sistema de

movimentação (para checar se o motor realmente dava conta de mover todo o sistema, e se a movimentação ocorria corretamente, e também se as alterações no software para incluir o controle do motor foram feitas corretamente), testes para checar se a leitura do encoder ocorria corretamente, e testes com todo o sistema montado (tanto mecânico como eletrônico) para validação final da máquina.

As Fig 29, Fig 30 e Fig 31 mostram fotos do sistema final.

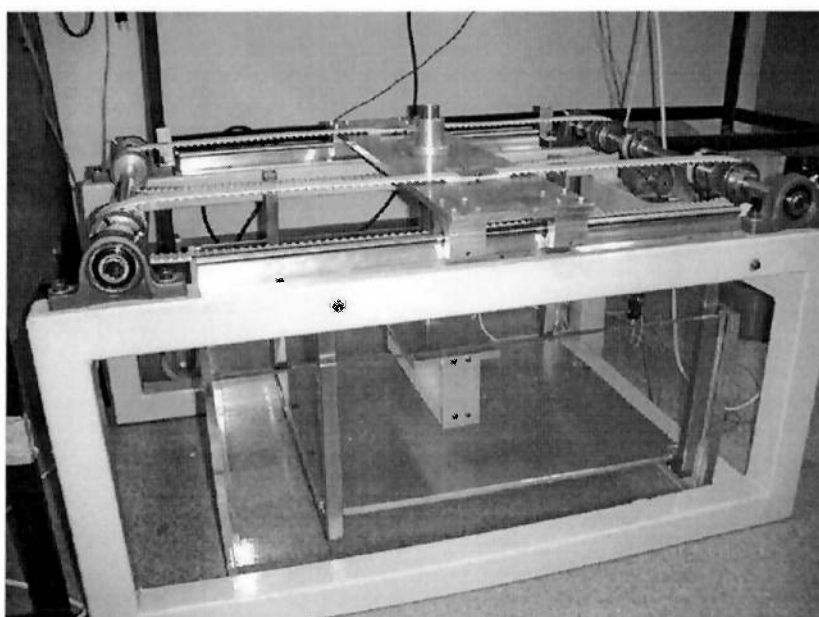


Fig 29 - Visão lateral da bancada de testes

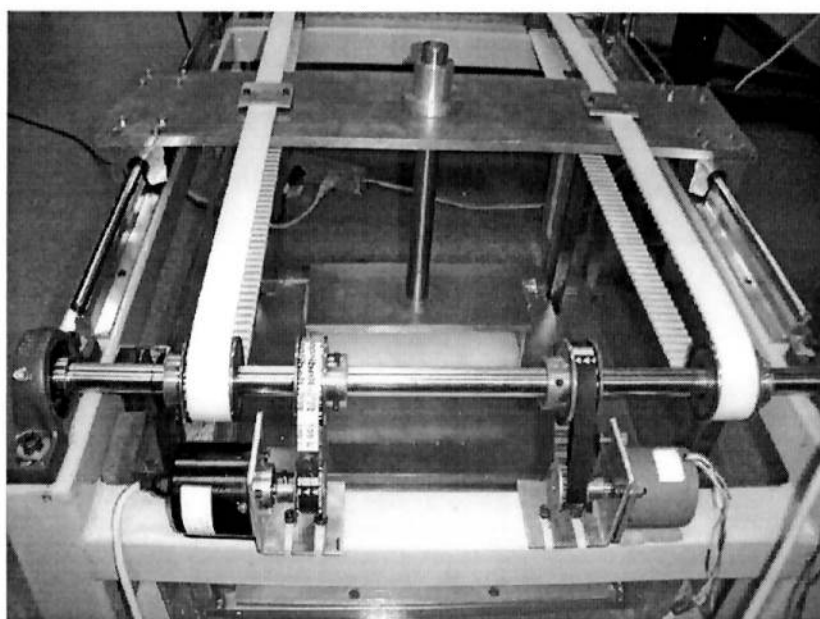


Fig 30 - Visão frontal da bancada de testes

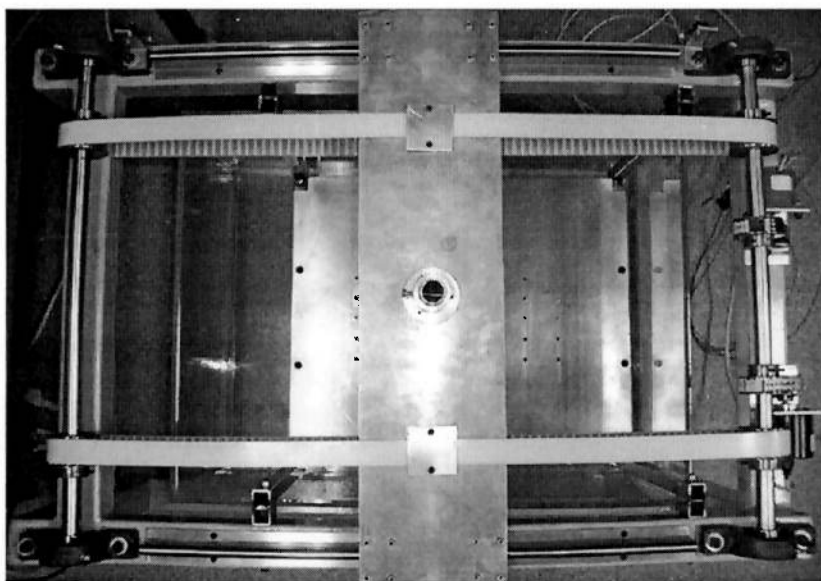


Fig 31 - Visão superior da bancada de testes

Além disso, foram feitas algumas aquisições para confirmar o funcionamento do processamento de sinais. Para facilitar a visualização dos resultados, foi feita uma pequena rotina em Matlab para mostrar os sinais adquiridos.

Uma primeira tela mostra um gráfico de espessura de toda a região varrida (no caso, apenas com um transdutor, logo apenas uma linha foi varrida). Nesta tela pode-se escolher um ponto qualquer da região varrida (que corresponde a um pulso enviado pelo transdutor), e partir deste ponto é possível plotar o sinal adquirido, que já vem com seus respectivos picos detectados. Na Fig 32 pode ser vista a primeira tela da rotina, com um ponto escolhido, e na Fig 33 pode ser visto o sinal correspondente àquele ponto.

Além disso, é possível plotar gráficos da coluna d'água medida (ou seja, o primeiro TOA) e da espessura do corpo de prova (a diferença entre o segundo e o primeiro TOA). Um exemplo de gráfico de espessura pode ser visto na Fig 34.

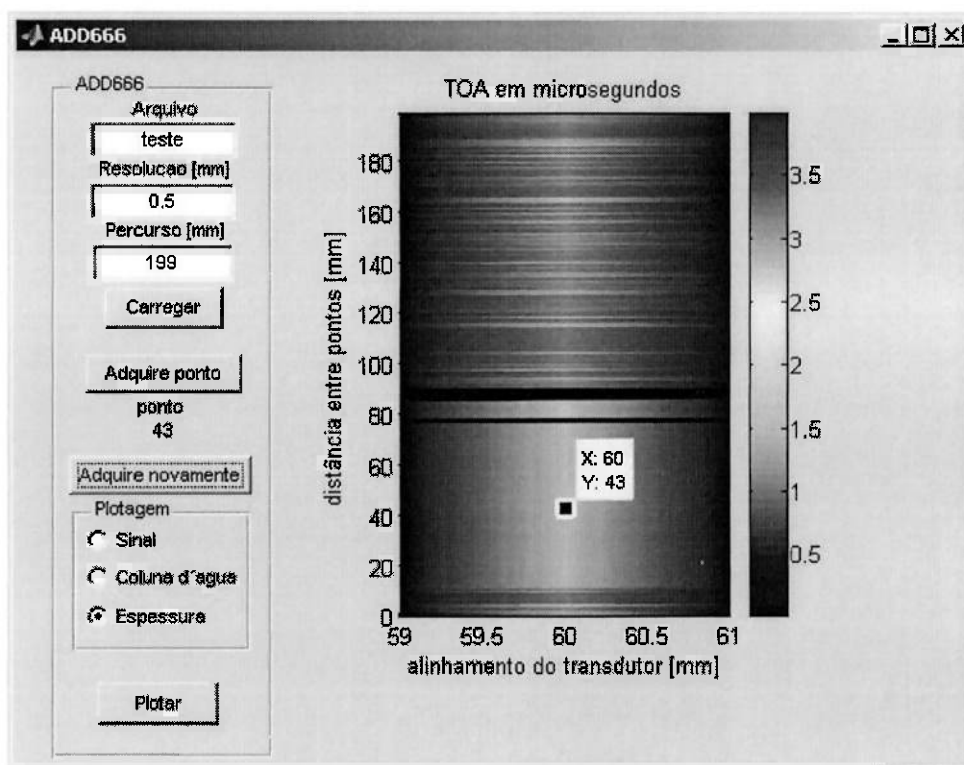


Fig 32 - Tela inicial da rotina em Matlab, com um ponto escolhido

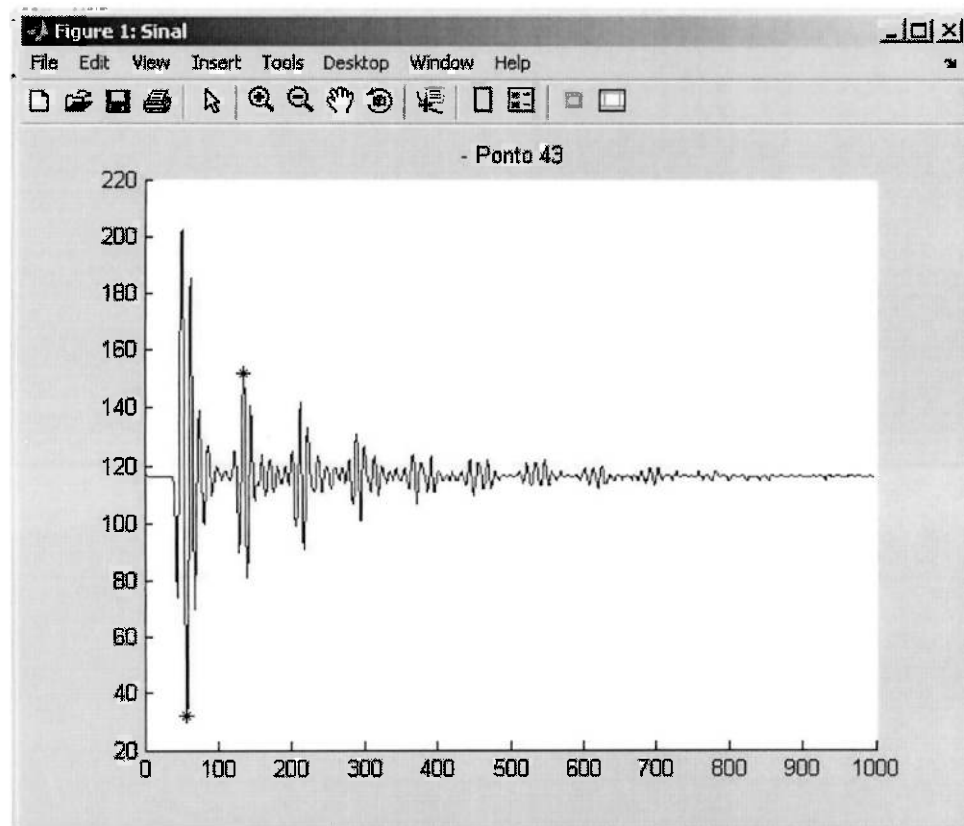


Fig 33 - Sinal correspondente ao ponto escolhido, com seus respectivos picos detectados

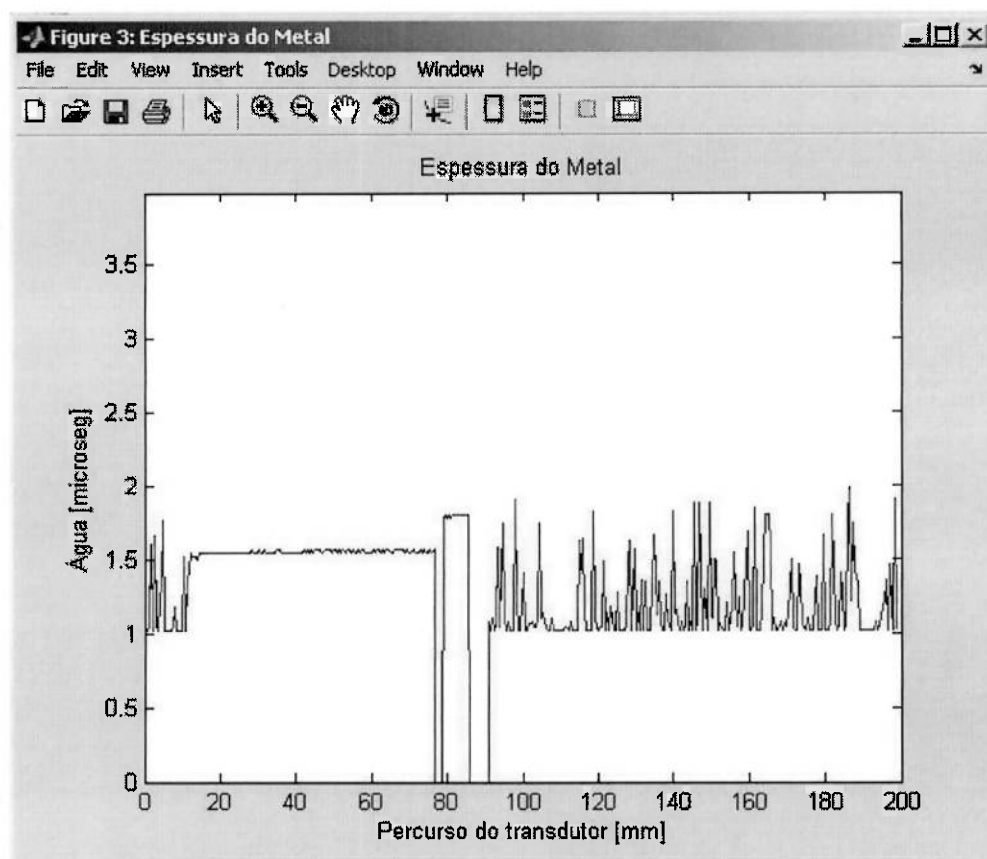


Fig 34 - Espessura do corpo de prova (No caso uma chapa de alumínio, colocada entre a posição 18 mm e 75 mm)

Este sistema final ainda conta com apenas um transdutor, pois o circuito eletrônico para excitar diversos transdutores ainda não foi desenvolvido (este sistema será desenvolvido como trabalho de outros alunos), porém já está pronto para receber até oito transdutores.

O transdutor está sendo excitado por um pulsador/receptor próprio para este tipo de aplicação.

7 CONCLUSÕES

O projeto da bancada de testes foi realizado com sucesso. O sistema foi desenvolvido sem maiores problemas, e o sistema resultante funciona como era esperado.

O processamento digital por detecção de picos funcionou corretamente, gerando resultados melhores que a detecção por limiar. Além disso, foi possível detectar a segunda parede, e desta maneira medir a espessura com maior certeza que nos casos antigos. O algoritmo ainda precisa de melhoras, porém já se demonstra que o processamento digital virá como opção certa na substituição dos circuitos analógicos de detecção por limiar. Com sua implementação também foi constatada facilidade no desenvolvimento de processamentos digitais em tempo real com FPGAs e redução do tempo de projeto e dos custos de desenvolvimento em relação a projetos de sistemas convencionais.

Com a bancada funcionando corretamente, o desenvolvimento de novas tecnologias de inspeção por ultra-som será facilitado. Novos algoritmos de processamento digital poderão ser testados com pequenas modificações no hardware e no software do sistema. O desenvolvimento de sistemas de inspeção aprimorados permitirá a redução de custos para as empresas que necessitam deste serviço, além de colaborar na prevenção acidentes e catástrofes causadas por vazamentos de óleo.

8 REFERÊNCIAS

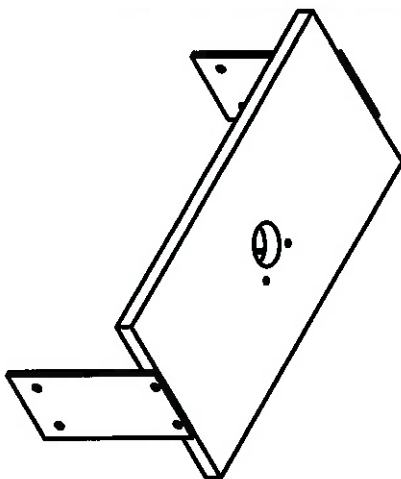
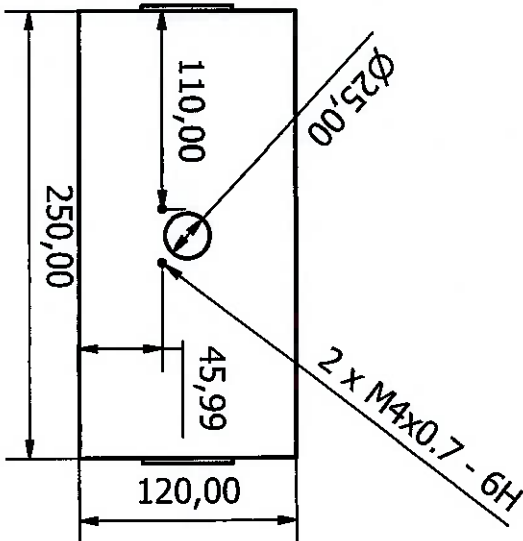
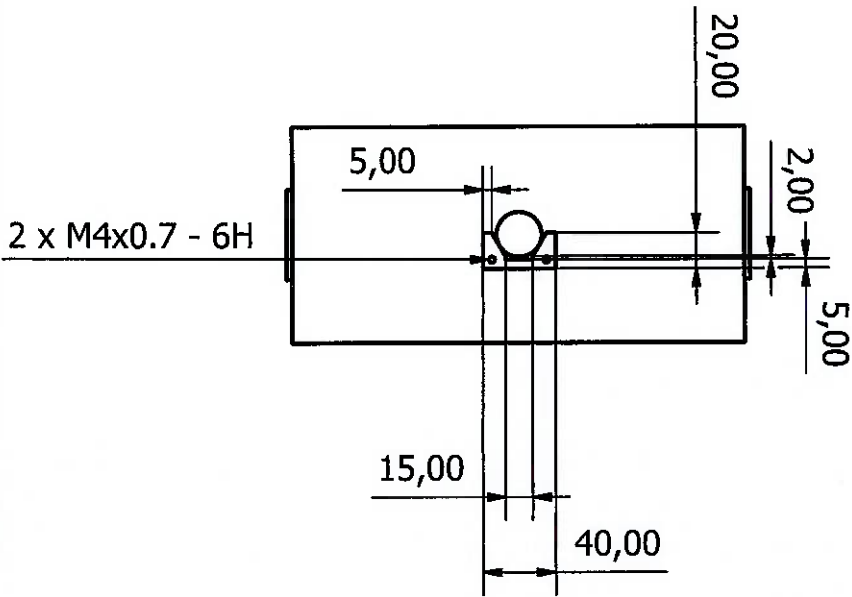
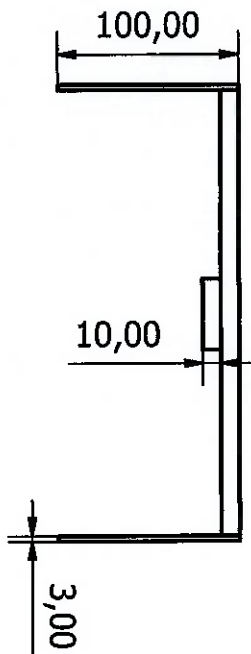
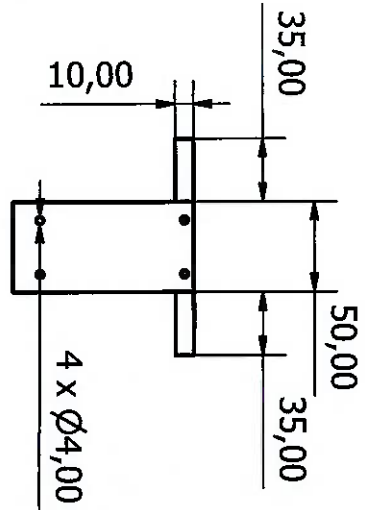
- [1] Balzer, M., Stripf, H., "Online Data Reduction with a DSP-FPGA Multiprocessor System", *ISSPA – International Symposium on Signal Processing and its Applications*, Kuala Lumpur, Malasia, 2001.
- [2] Furukawa, C. M., Adamowski, J. C., Camerini, C. S., "Desenvolvimento de um Pig Instrumentado para Inspeção de Oleodutos por Ultra-Som", III Induscon - IEEE, São Paulo, SP, set. 1998.
- [3] LIMA, F. V. F., "Desenvolvimento de um Sistema Acústico de Posicionamento Submarino", Dissertação de mestrado apresentada à Escola Politécnica da USP, São Paulo, 2003.
- [4] Lima, F. V. F., Furukawa, C. M., "Development of a High Resolution Underwater Positioning System", *XIV COBEM – Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica*, 2003.
- [5] Park, S., Jeong, H. D., Lim, Z. S., "Development of Mobile Robot System for Automatic Diagnosis of Boiler Tubes in Fossil Power Plants and Large Size Pipelines", *Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ, International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Suíça, 2002.
- [6] REBER, K., et. al., "A new Generation of Ultrasonic In-Line Inspection Tools for Detecting, Sizing and Locating Metal Loss and Cracks in Transmission pipelines", *IEEE Ultrasonics Symposium*, 2002.
- [7] Rede Nacional de Desenvolvimento de Instrumentação para PIG's Inteligentes, *Relatório Técnico Final*. Finep/CTPetro, 2004.
- [8] Suh, D. M., Kim, W. W., Chung, J. G., "Ultrasonic Inspection of Studs (Bolts) Using Dynamic Deconvolution and Wave Shaping", *IEEE*

Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, vol. 46, no. 2, Março, 1999.

- [9] VAN TREES, H.L. "Detection, Estimation, and Modulation Theory - Part I". New York: John Wiley, 1968.
- [10] KINO, G.S., "Acoustic waves : devices, imaging, and analog signal processing", Englewood Cliffs, N.J. : Prentice-Hall, c1987.
- [11] Nakazawa H., "Principles of Precision Engineering", Oxford University Press, Tóquio, 1994, p. 267
- [12] Alexandre H. Slocum, "Precision machine design", Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey 1992
- [13] Ogata K., "Engenharia de controle moderno", Prentice Hall 4ª Edição, São Paulo, 2003, p. 788

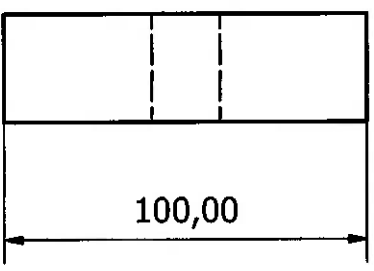
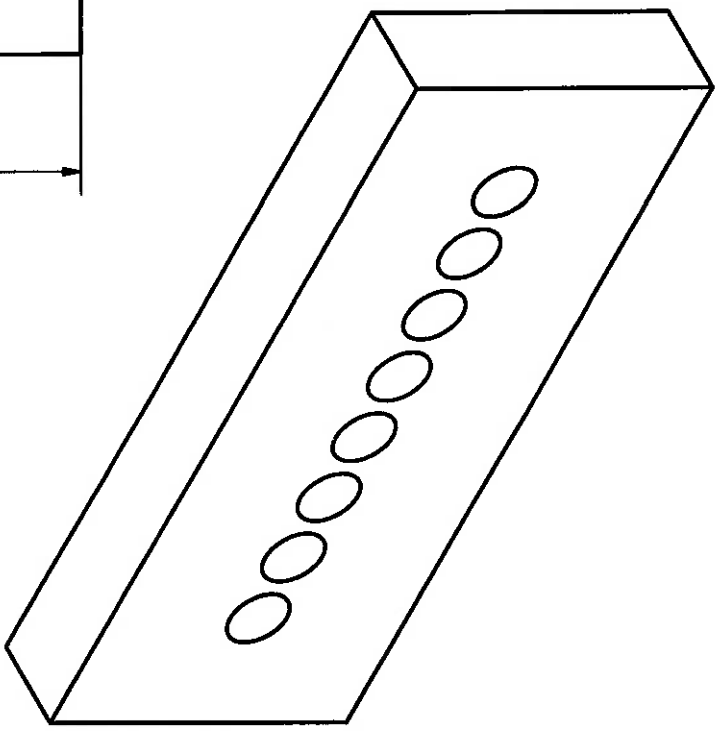
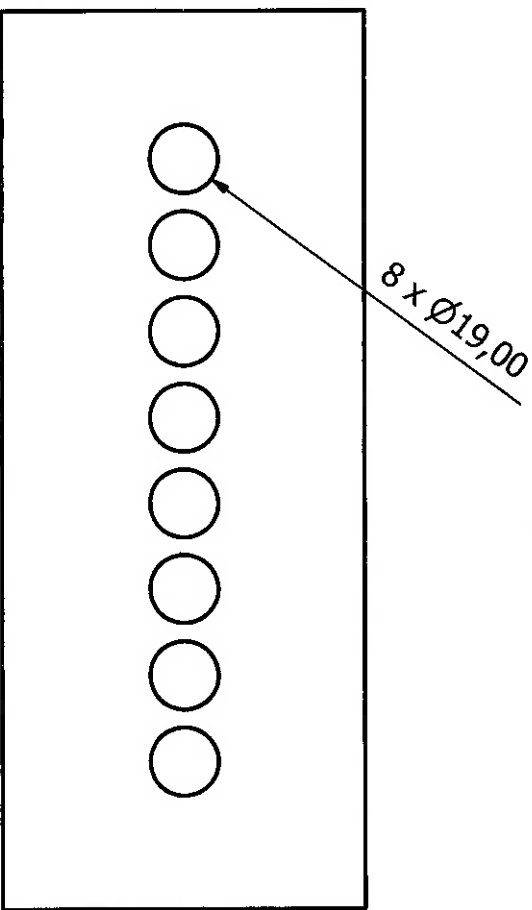
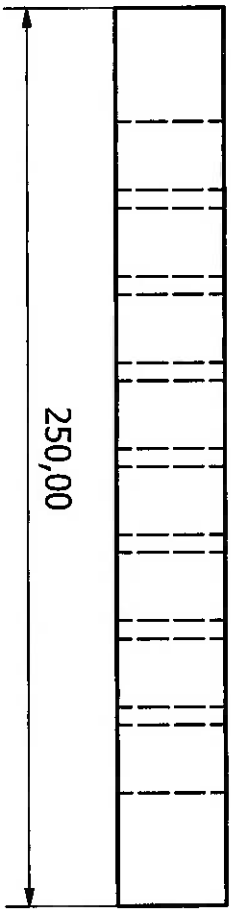
ANEXO A

Desenhos de fabricação e conjunto

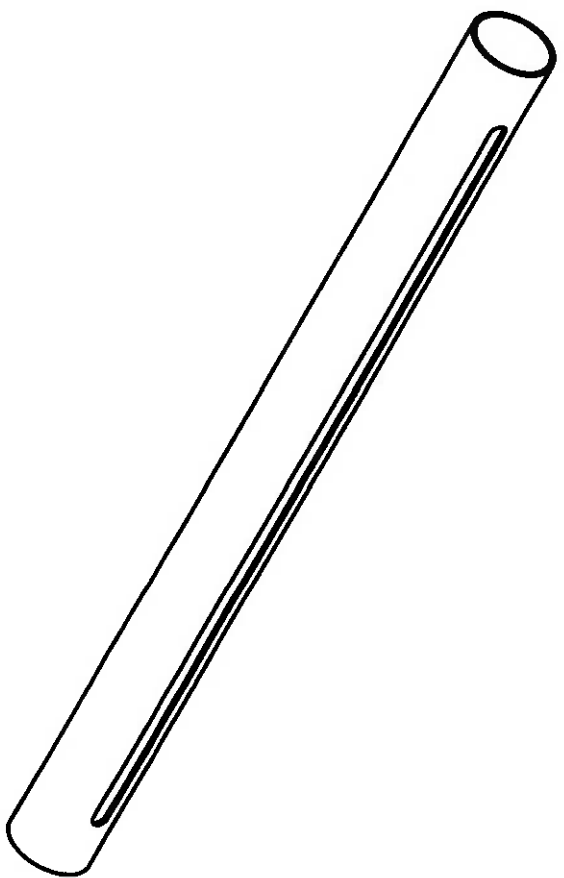
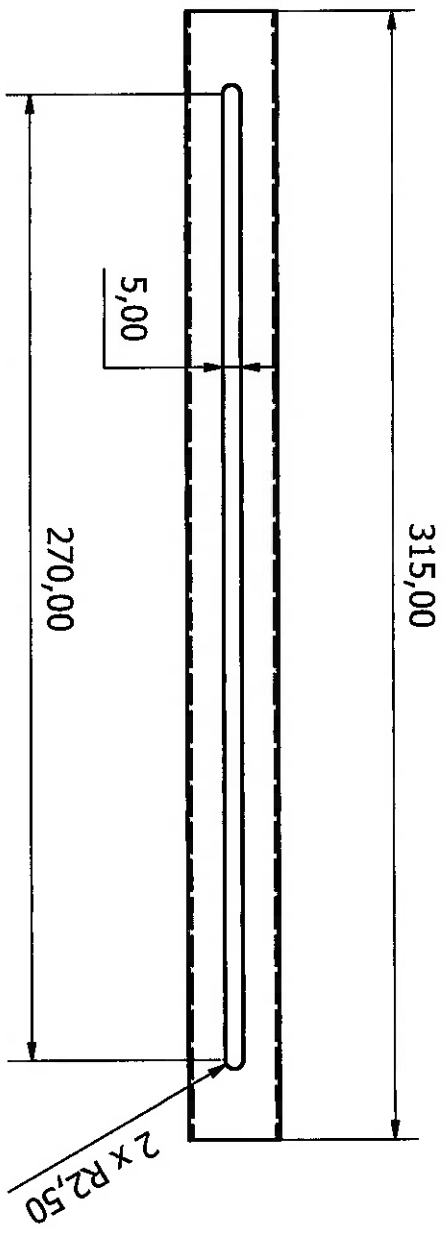


2 x M4x0.7 - 6H

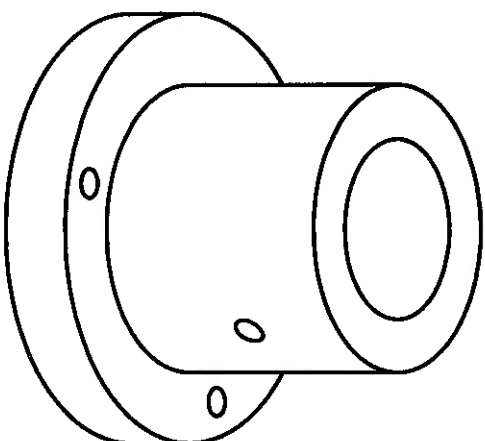
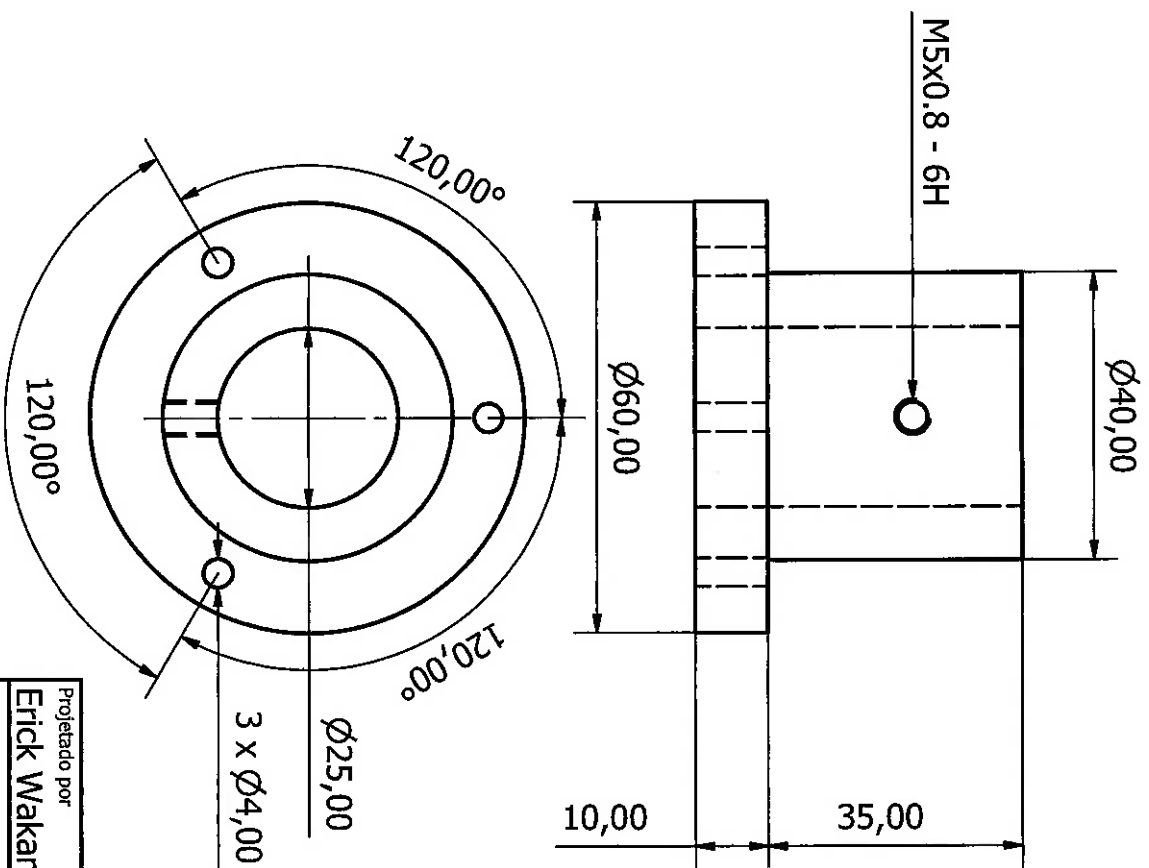
Projeto por		Projeto		Data		Quantidade	
Erick Wakamoto Takarabe		BTIU		01/10/2006		1	
PMR 2550 - Trabalho de Formatura		Peça		Suporte Transdutores		Escala	
Material		Unidade		mm		1:4	
Alumínio							



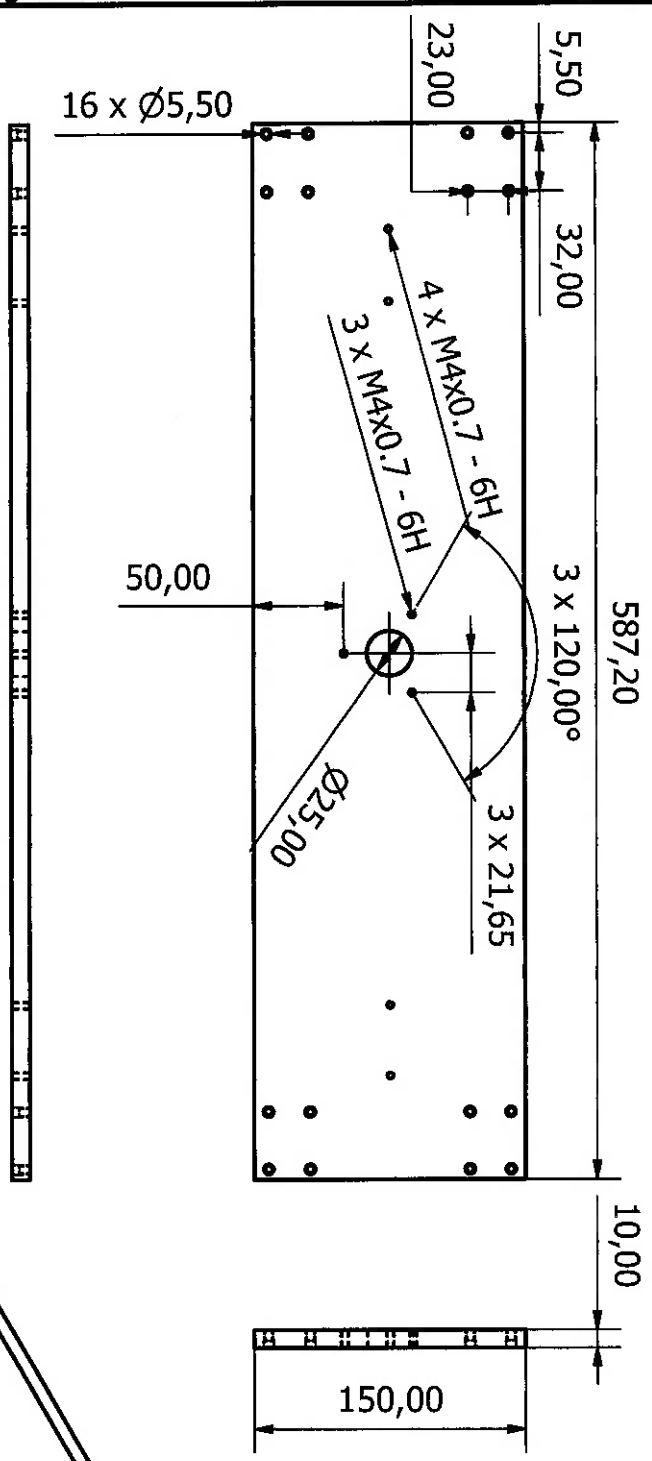
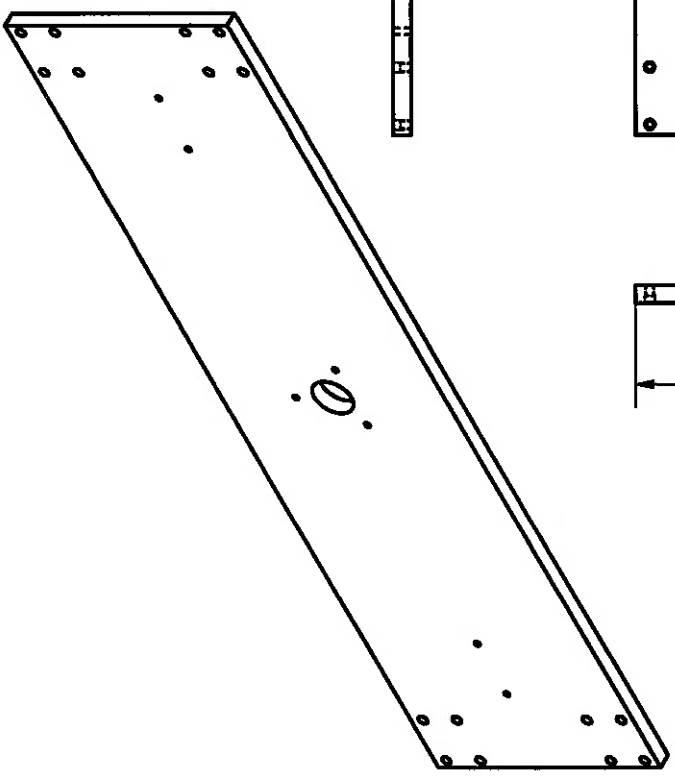
Projetado por		Projeto	Data	Quantidade
Erick Wakamoto Takarabe		BTIU	01/10/2006	1
PMR 2550 - Trabalho de Formatura		Peca		
		Fixador dos Transdutores		
		Material	Unidade	Escala
Nylon			mm	1:2



Projetado por		Projeto		Data		Quantidade	
Erick Wakamoto Takarabe		BTIU		01/10/2006		1	
PMR 2550 - Trabalho de Formatura		Peca					
Eixo suporte dos transdutores		Material					
Aço Inox		Unidade		Escala			
		mm		1:2			



Projetado por		Projeto		Data		Quantidade	
Erick Wakamoto Takarabe		BTIU		01/10/2006		1	
PMR 2550 - Trabalho de Formatura		Peça		Flange do eixo suporte			
		Material		Unidade		Escala	
		Alumínio		mm		1:1	



Projetado por
Erick Wakamoto Takarabe

Projeto
BTIU

Data
01/10/2006

Quantidade
1

PMR 2550 - Trabalho de Formatura

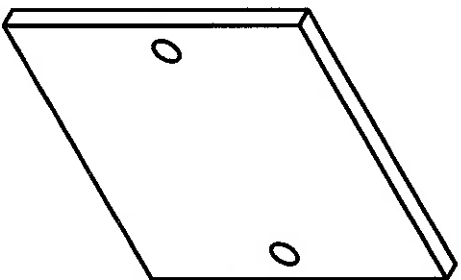
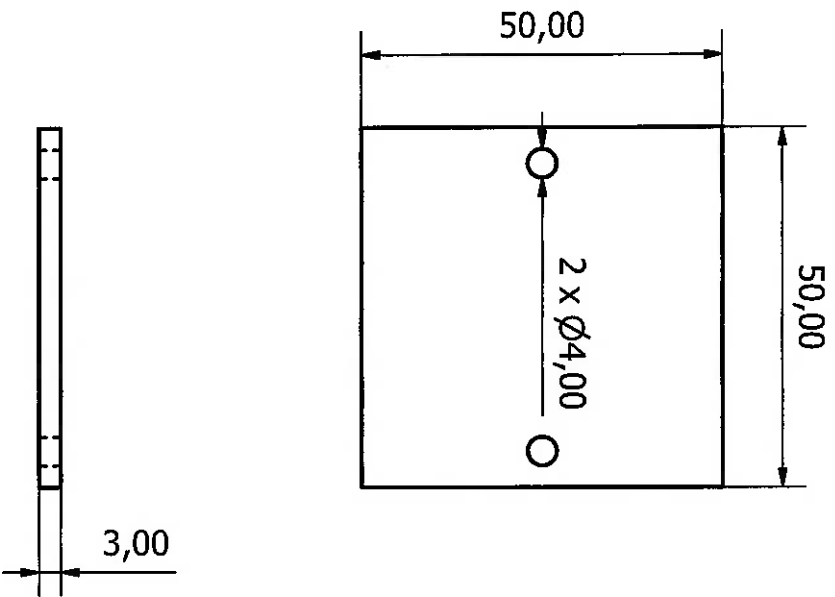
Mesa suporte dos transdutores

Material
Alumínio

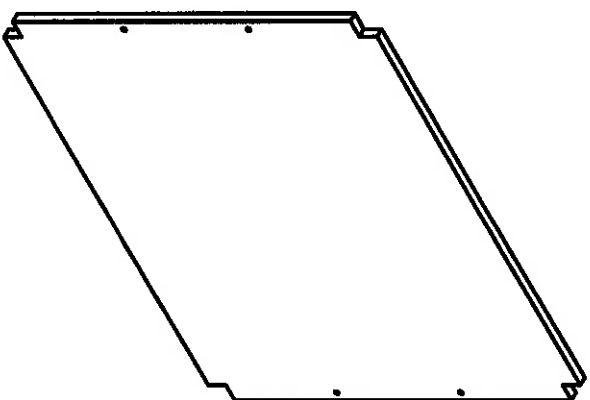
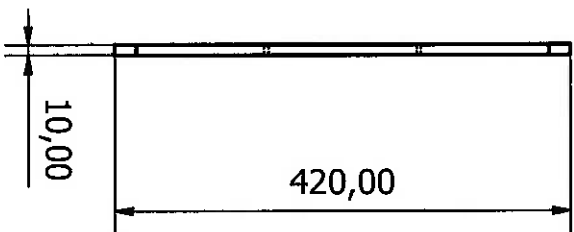
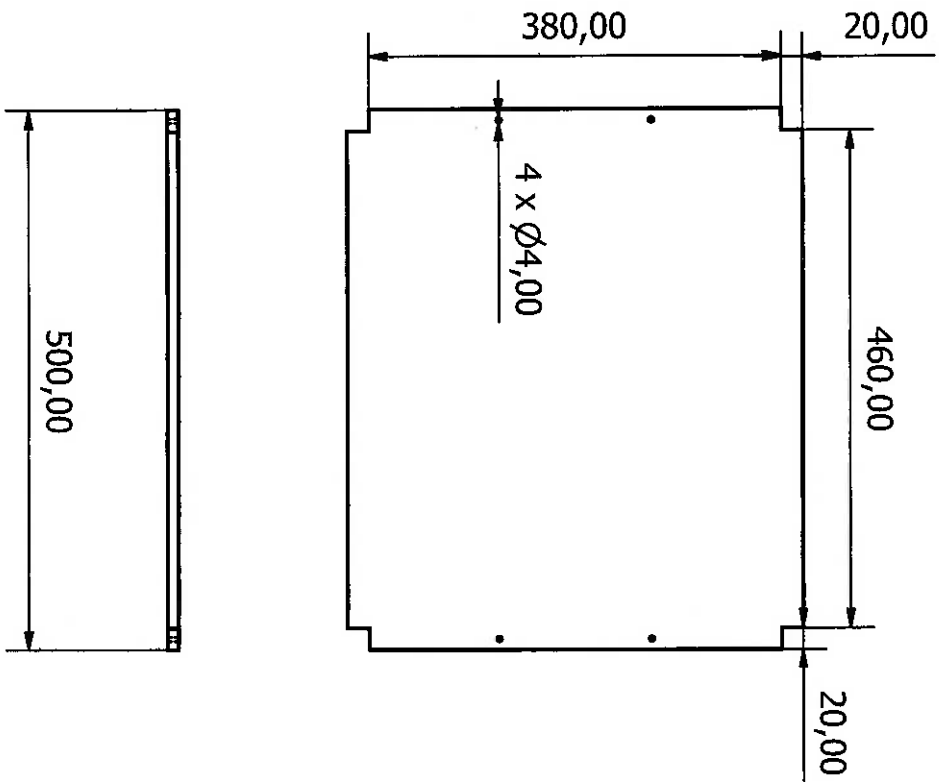
Unidade
mm

Escala
1:4

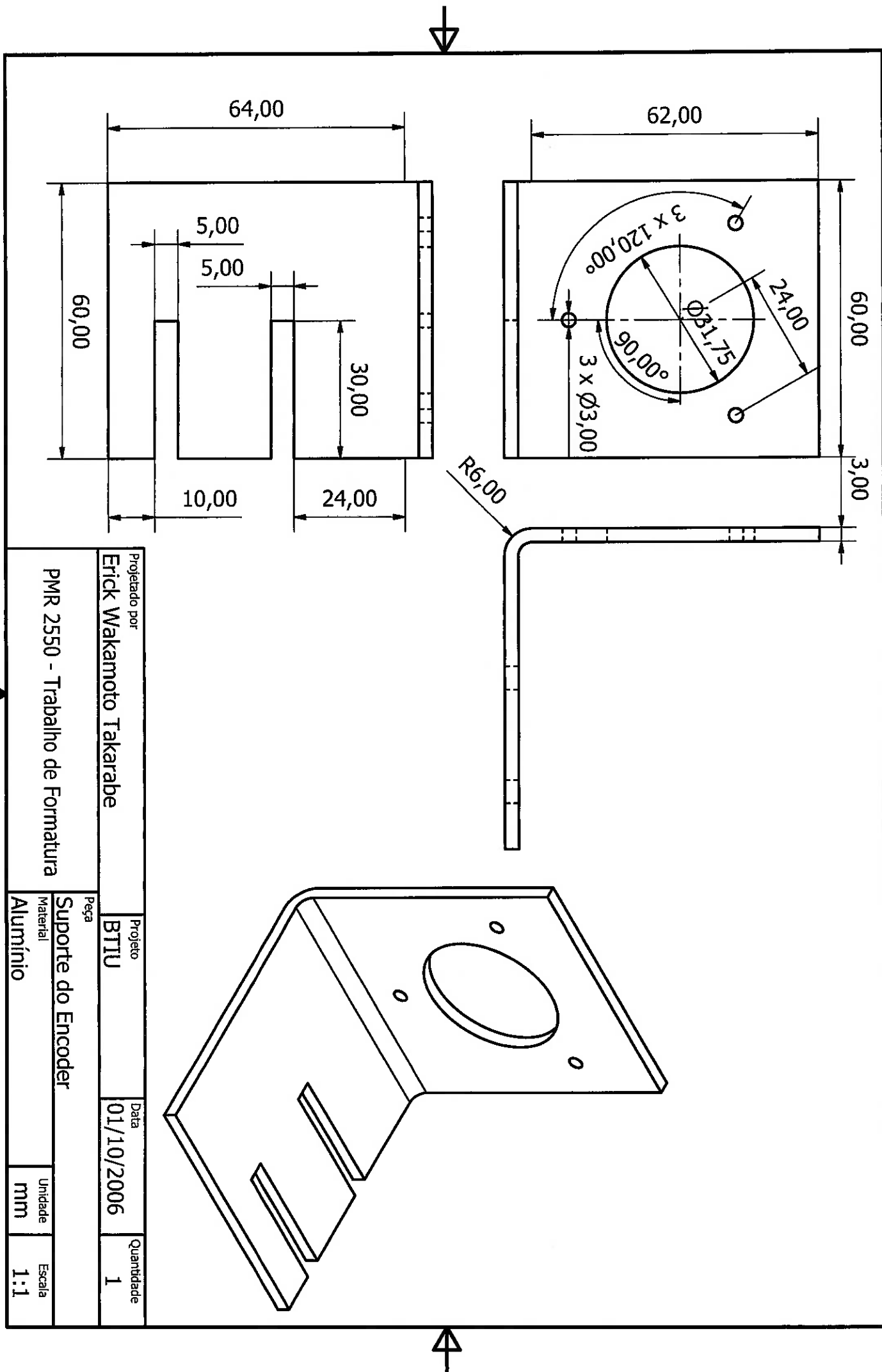




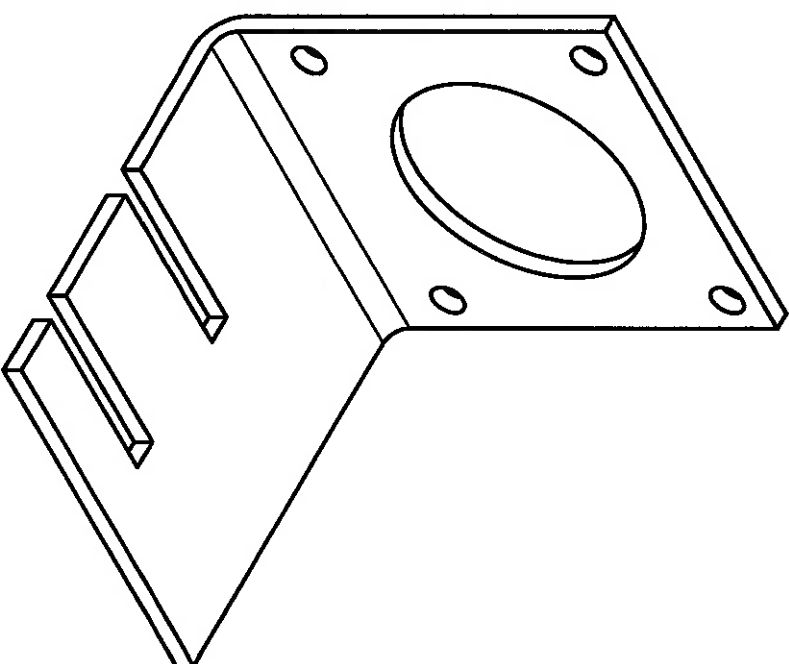
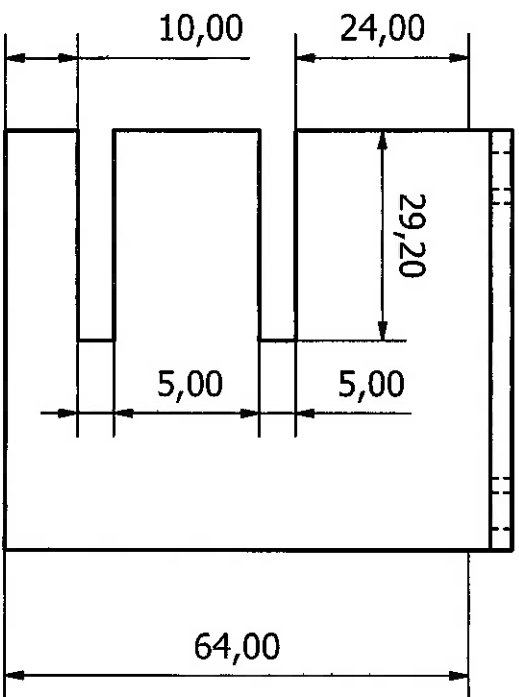
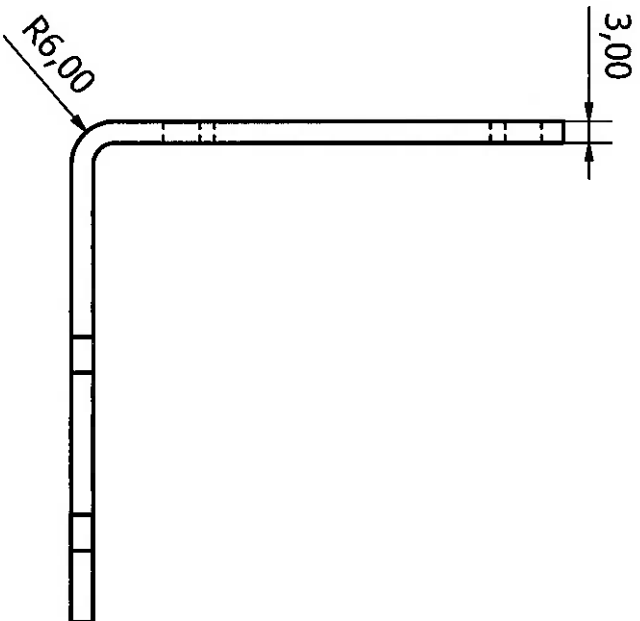
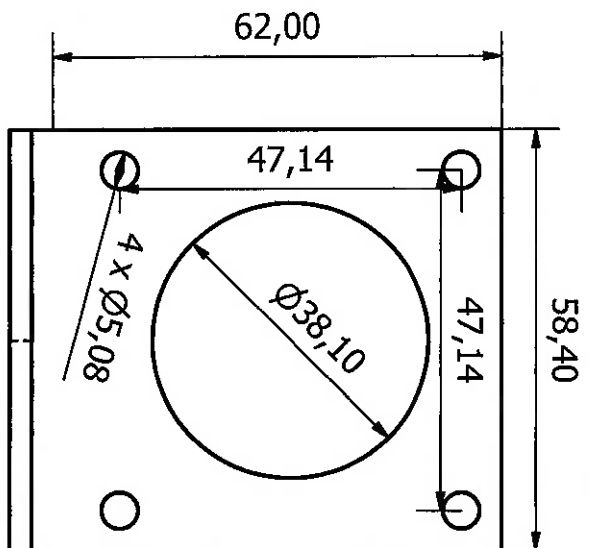
Projetado por		Projeto	Data	Quantidade
Erick Wakamoto Takarabe		BTIU	01/10/2006	2
PMR 2550 - Trabalho de Formatura		Peça		
		Fixador da correia		
Material		Unidade		Escala
Alumínio		mm		1:1



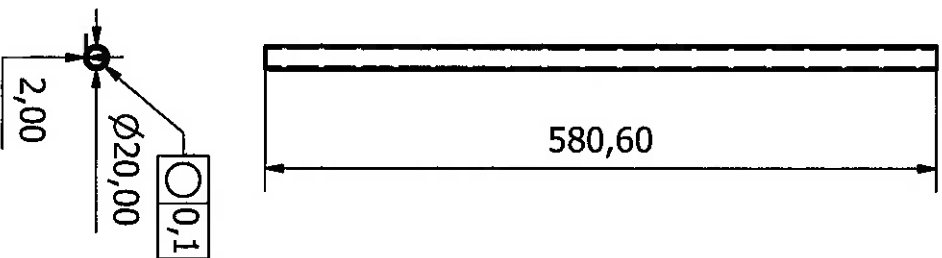
Projetado por		Projeto	Data	Quantidade
Erick Wakamoto Takarabe		BTIU	01/10/2006	1
PMR 2550 - Trabalho de Formatura		Mesa da peça		
Material		Unidade		
Alumínio		mm		
		Escala		
		1:8		



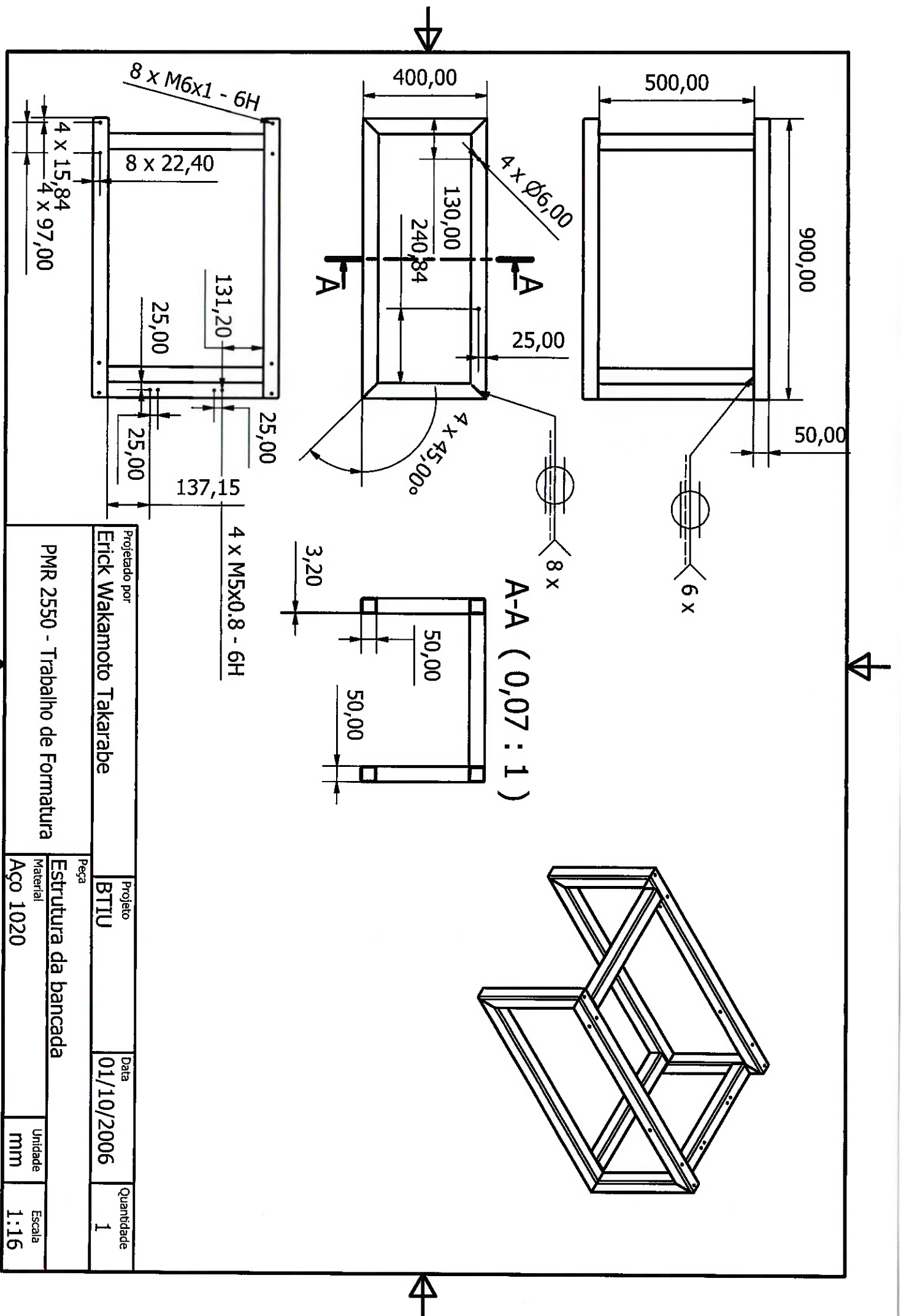
Projetado por		Projeto		Data		Quantidade	
Erick Wakamoto Takarabe		BTU		01/10/2006		1	
PMR 2550 - Trabalho de Formatura		Peça		Material		Unidade	
		Suporte do Encoder		Alumínio		mm	
						Escala	
						1:1	



Projetado por		Projeto		Data		Quantidade	
Erick Wakamoto Takarabe		BTIU		01/10/2006		1	
PMR 2550 - Trabalho de Formatura		Peça					
		Suporte do motor					
Material		Unidade		Escala			
Alumínio		mm		1:1			



Projetado por		Projeto		Data		Quantidade	
Erick Wakamoto Takarabe		BTIU		01/10/2006		2	
PMR 2550 - Trabalho de Formatura		Peça		Eixo de movimentação			
		Material		Unidade		Escala	
		Aço inox		mm		1:4	



Projetado por
Erick Wakamoto Takarabe

Projeto
BTIU

Data
01/10/2006

Quantidade
1

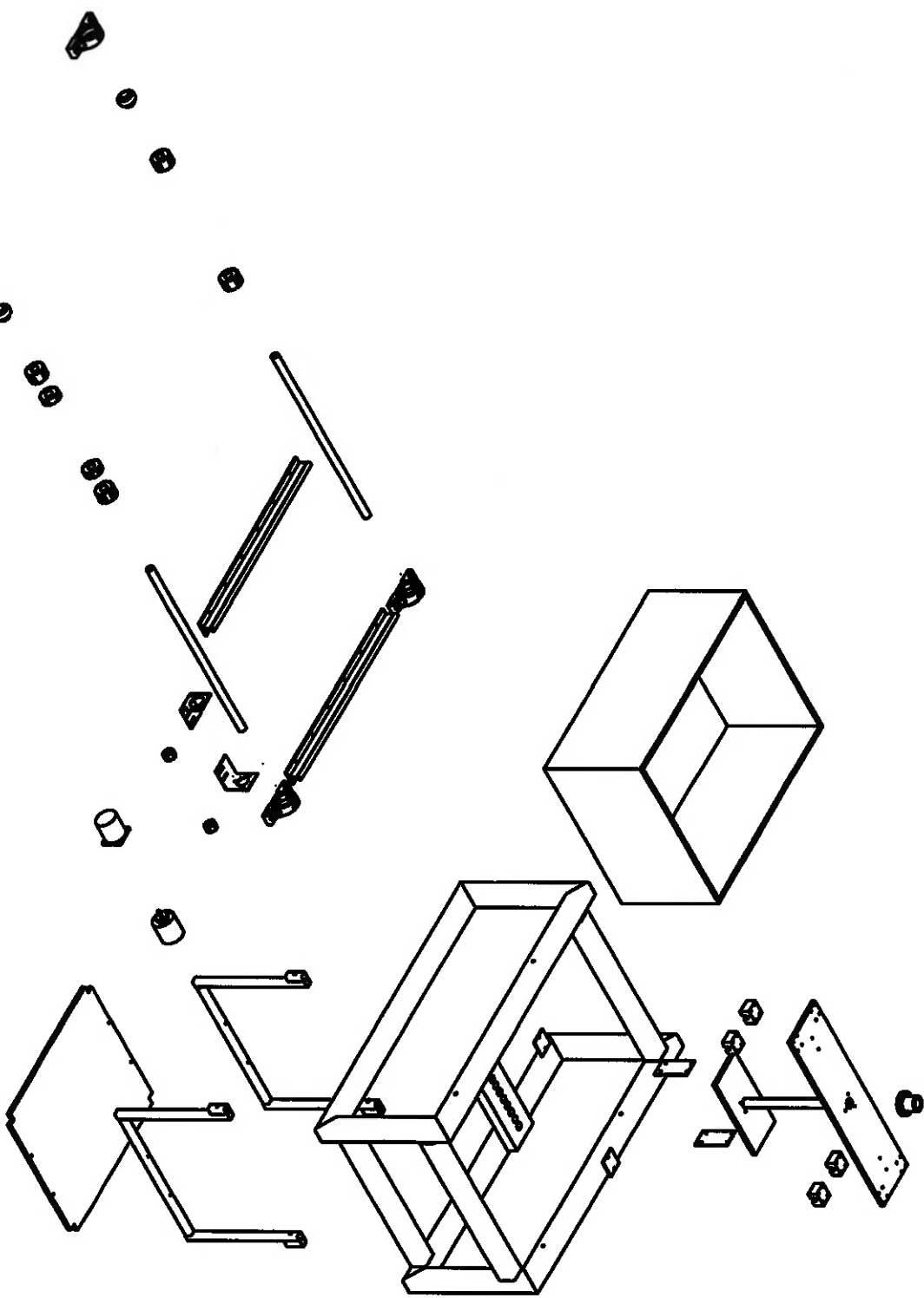
PMR 2550 - Trabalho de Formatura

Peça
Estrutura da bancada

Material
Aço 1020

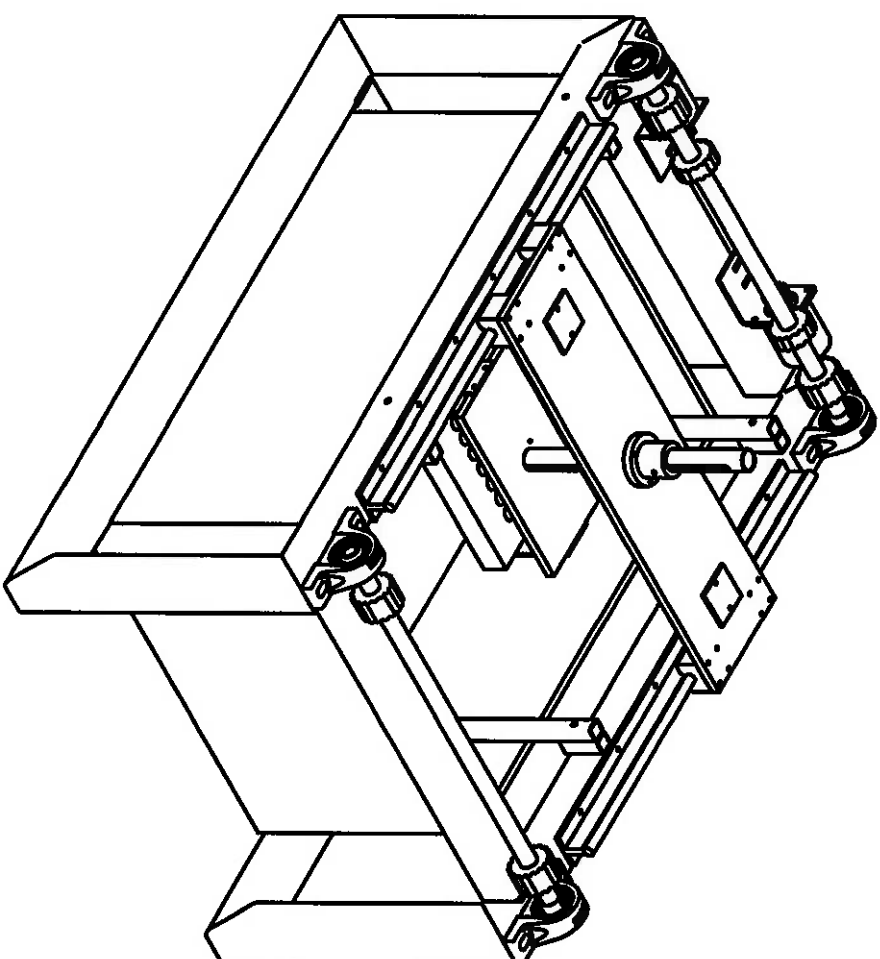
Unidade
mm

Escala
1:16



Projetado por	Projeto	Data	Quantidade
Erick Wakamoto Takarabe	BTIU	01/10/2006	1

PMR 2550 - Trabalho de Formatura	Peca	BTIU com vista explodida
	Material	
Variado	Unidade	Escala
	mm	1:16



Projetado por		Projeto		Data		Quantidade	
Erick Wakamoto Takarabe		BTIU		01/10/2006		1	
PMR 2550 - Trabalho de Formatura		Peça					
		BTIU montada					
		Material		Unidade		Escala	
Variado				mm		1:8	

ANEXO B

Encoder

Datasheet ENCODER

- Eixo Rígido
- Resolução até 5000 pulsos
- Diâmetro 61mm com flange redonda em alumínio
- Com várias opções de cabos e conectores

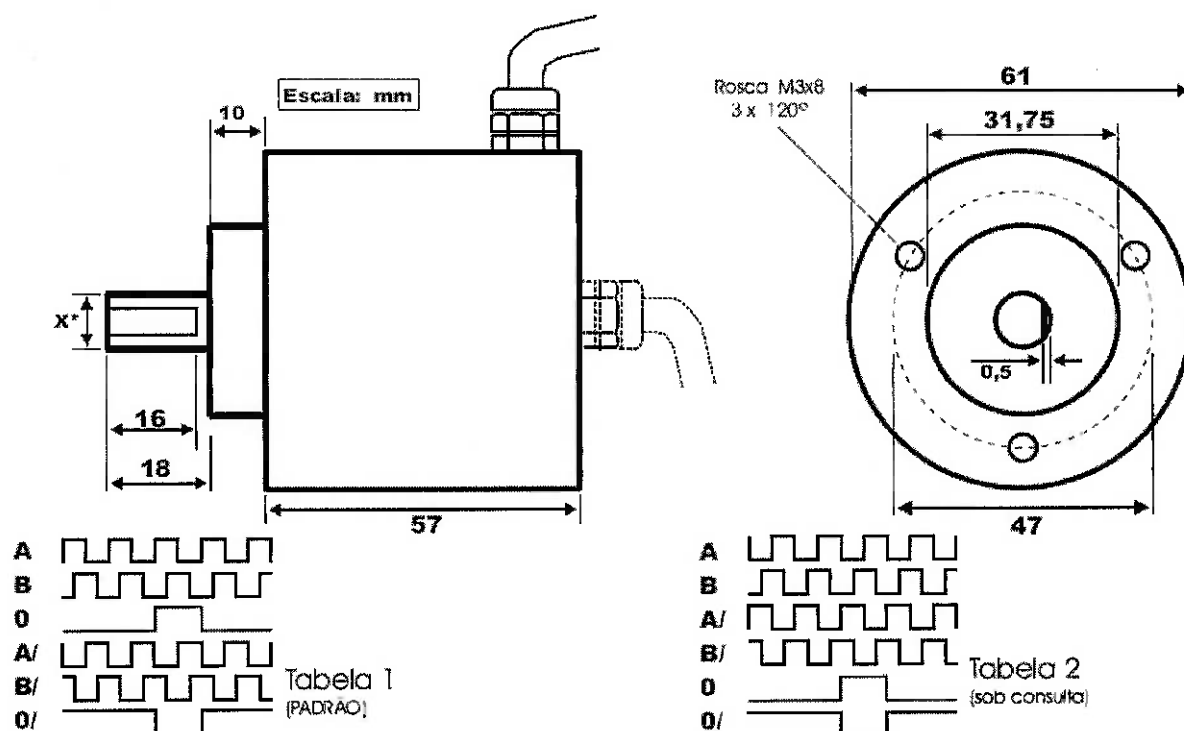


CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS

Base	Alumínio
Tampa	Zamak
Eixo	Aço Inox.
Rolamentos	6000ZZ
Peso	0,4 kg
Grau de protecção (padrão)	IP54
Rotação máxima	6000RPM
Carga radial máxima	15kg
Carga axial máxima	15kg

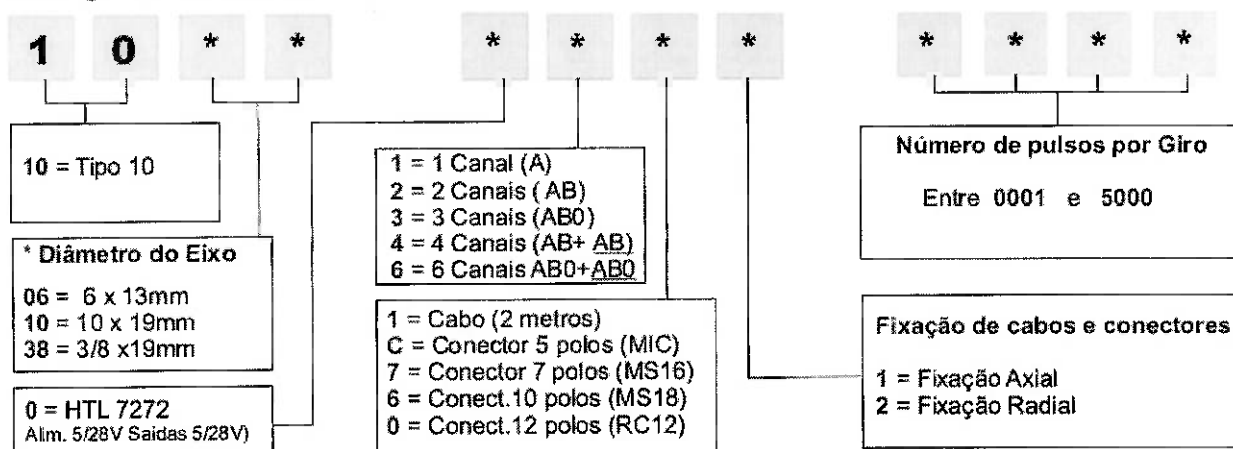
CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS

Alimentação	5 a 28Vdc
Corrente total máxima	80mA
Corrente máxima por saída	20mA
Frequência máxima	130kHz
Temperatura de operação	-10 a +80°C
Pulsos por giro	até 5000



Ligação do Encoder						
	Cabos		5 polos	Conectores		
	4 vias	5 vias e 8 vias		7 polos	10 polos	12 polos
Comum	preto	marrom	1	F	F	1
+ Vcc	vermelho	vermelho	2	D	D	2
Canal A	azul	laranja	3	A	A	3
Canal B	branco	amarelo	4	B	B	4
Canal 0	-----	verde	5	C	C	5
Canal A/	-----	azul	-	-	H	6
Canal B/	-----	violeta	-	-	I	7
Canal 0/	-----	cinza	-	-	J	8

Código para compra



ANEXO C

Driver do motor de passo

Escola Politécnica da USP
Dep. Engenharia Mecatrônica e Sistemas Mecânicos

Placa Acionadora de Motor de Passo (PAMP)

Manual do Usuário

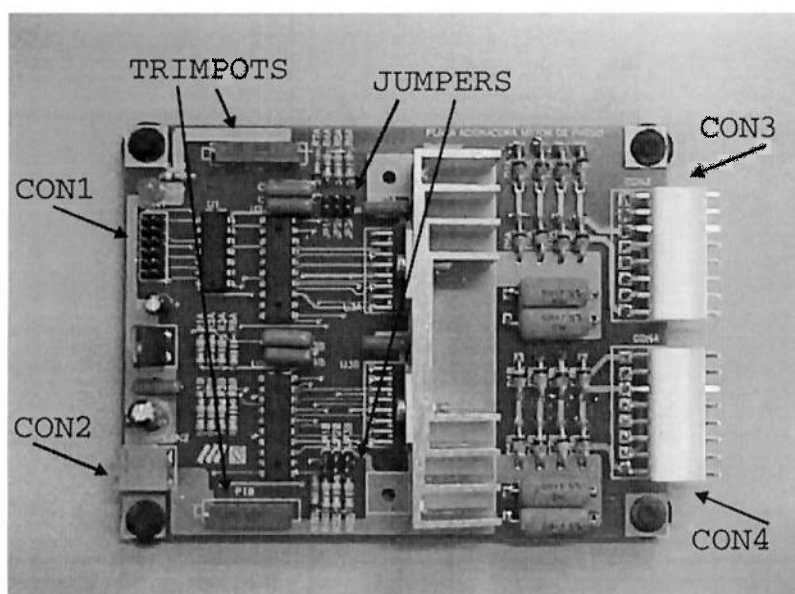
Eng. Nilson Noris Franceschetti
Prof. Julio Cezar Adamowski

agosto de 2002

Introdução:

O objetivo deste manual é familiar os usuários desta placa com suas características e seu modo de operação.

A Placa Acionadora de Motor de Passo (PAMP) pode ser visualizada na figura abaixo:



A PAMP possui as seguintes características:

- Capacidade de acionar dois motores de passo
- Operação no modo Full ou Half Step
- Controle de Direção CW/CCW
- Aciona apenas motores de 12V
- Corrente máxima de 3A por fase
- Interface com nível lógico TTL
- Alimentação de 12V, sendo +5V gerado internamente

- Proteção de sobrecorrente

Esta placa 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 (vide folha de dados do fabricante), e por um CI de potência (STL298) que fornece a tensão e corrente necessária para o acionamento do motor (vide folha de dados do fabricante).

O circuito aqui empregado é baseado no Application Note da SGC-THOMSON, cujo artigo também encontra-se anexo. 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.

Identificando o circuito:

O esquema elétrico completo está apresentado no final do manual. Os dois circuitos de acionamento independentes são interfaceados para um controlador (PC ou microcontrolador) através do circuito de buffer U1 (7407), cuja finalidade é proteger a placa de eventuais erros de conexão e assim não danificar sua parte de acionamento (potência), ou proteger o controlador de uma eventual pane no circuito de acionamento.

A conexão é realizada através do conector CON1, onde todos os sinais são níveis lógico TTL, sendo a pinagem descrita abaixo:

Pinos	Função
1 e 2	Determina o sentido de rotação do motor "1" Nível 1 => Sentido Horário (CW) Nível 0 => Sentido Anti-horário (CCW)
3 e 4	Sinal de clock do motor "1" A borda de descida deste sinal implica em um passo do motor
5 e 6	Sinal de Enable do Motor "1" Nível 1 => Habilita o Motor Nível 0 => Desabilita o Motor
7 e 8	Determina o sentido de rotação do motor "2" Nível 1 => Sentido Horário (CW) Nível 0 => Sentido Anti-horário (CCW)
9 e 10	Sinal de clock do motor "2" A borda de descida deste sinal implica em um passo do motor
11 e 12	Sinal de Enable do Motor "2" Nível 1 => Habilita o Motor Nível 0 => Desabilita o Motor

Para identificar os pinos na placa veja a foto abaixo:

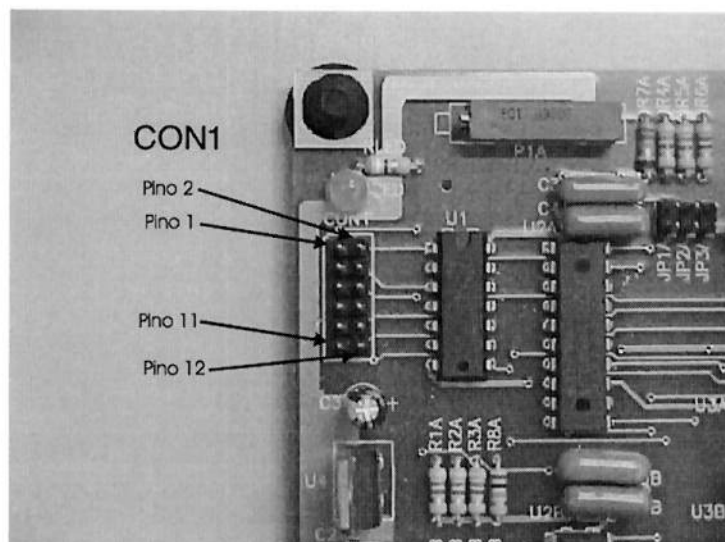


Foto identificando os pinos do interface com o controlador.

O circuito requer uma alimentação de +12 Vcc. A alimentação do circuito deve ser realizada através do conector CON2, cuja pinagem é apresentada abaixo:

Pino	Função
1	+ 12 Tensão de corrente continua
2	GND - referência

Para identificar os pinos na placa veja a foto abaixo:

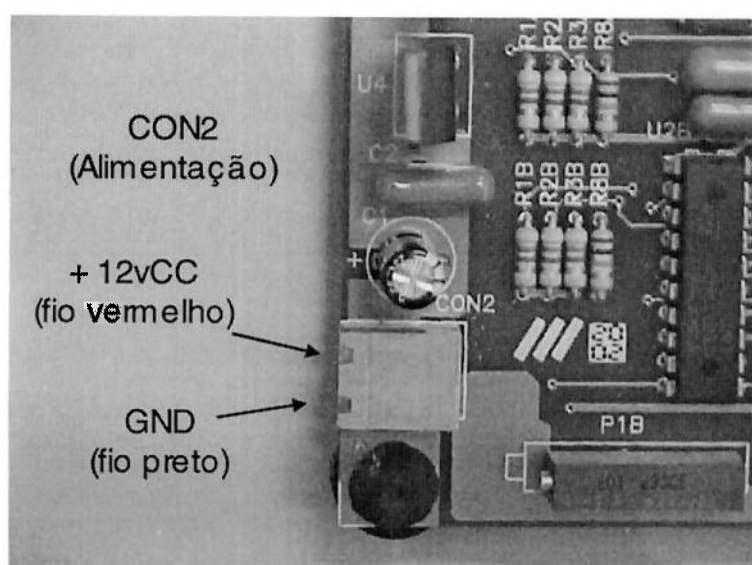


Foto identificando os pinos da Alimentação do PAMP.

A conexão com o motor de passo deve ser realizado através do Conector CON3 para o motor "1" e do conector 4 para o motor "2". A Figura abaixo apresenta a pinagem para ambos os conectores.

Pinos	Função
1	Ponto de Conexão A do motor
2 e 5	Conexão dos enrolamentos do motor
3	Ponto de Conexão B do motor
4 e 7	Conexão dos enrolamentos do motor
6	Ponto de Conexão A' do Motor
8	Ponto de Conexão B' do Motor

Para identificar os pinos na placa veja a foto abaixo:

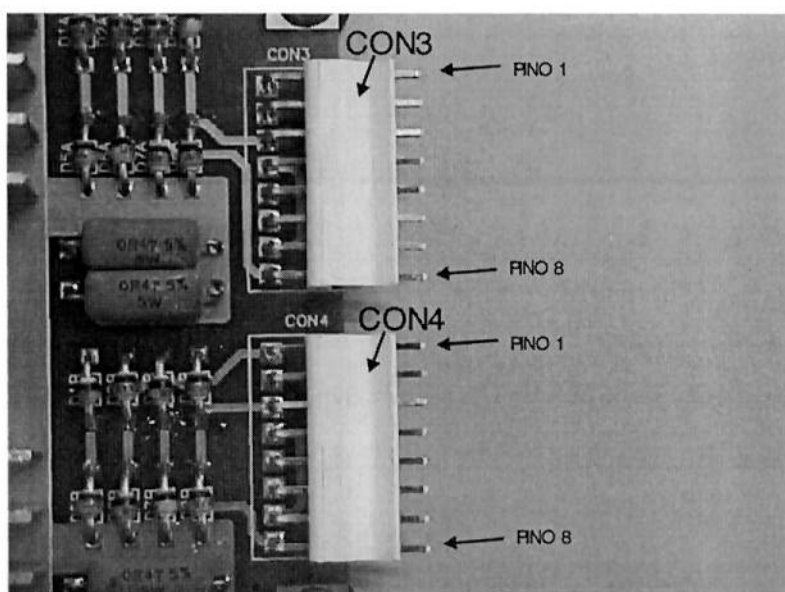


Foto identificando os pinos de conexão do motor.

A PAMP possui 6 jumpers que podem ser usados em função do tipo de motor e necessidade de funcionamento. Veja a foto de apresentação da PAMP.

Cada circuito de motor possui 3 jumpers. A utilização do jumper indica que se utilizado está se aplicando nível lógico 0, e a sua não utilização implica em nível lógico 1. Os jumpers dos dois circuitos e suas funções estão descritos na tabela abaixo:

Jumper	Função
JP1A/B	“Reseta” o acionamento Nível 1 => Reset Nível 0 => Funcionamento normal
JP2A/B	Determina o modo de funcionamento do Motor Nível 1 => HALF Step* Nível 2 => FULL Step*
JP3A/B	Define a ação do Chopper* Nível 1 => Chopper atua nas fases ABCD* Nível 0 => Chopper atua em INH1 e INH2
	* Veja em anexo o Application Note para maiores informações

O circuito possui ainda um par de potenciômetros (P1A e P1B) que podem ser ajustados para ajustar tensão de referência do Chopper interno do ST297. Esta tensão de referência determina o nível máximo de corrente de pico que pode ser aplicada às fases do motor. Rotacionando-se o potenciômetro no sentido horário aumenta-se a tensão de referência e consequentemente impõe-se uma maior corrente de pico nas fases.

Maiores informações podem ser obtidas através do Application Note em anexo.

Funcionamento da PAMP:

Para o funcionamento da placa, basta seguir as instruções passo a passo indicadas abaixo (em caso de dúvida quanto a polaridade consulte o manual novamente):

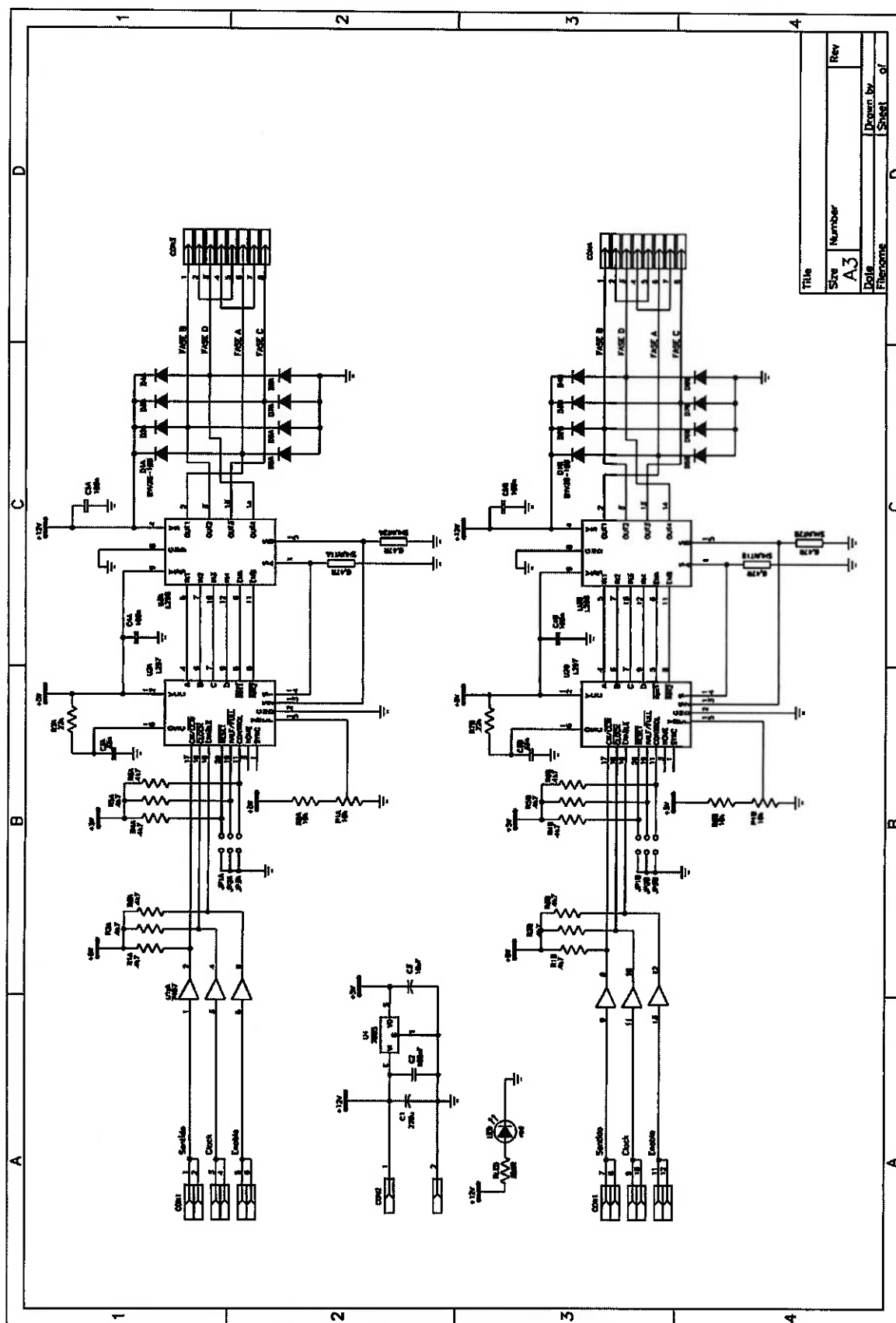
- 1) Configure ou confira os Jumpers conforme sua necessidade. A placa encontra-se pré-configurada para o tipo de motor a ser utilizado no laboratório;
- 2) Conecte o conector que alimenta as fases do motor (CON3 e/ou CON4), obedecendo as guias de polaridades;
- 3) Conecte o cabo de interface controlador-PAMP (CON1) obedecendo as polaridades;

- 4) Conecte o cabo de alimentação no conector CON2, obedeça a polaridade. Antes de ligar a fonte tenha certeza absoluta de que a fonte não está invertida.
- 5) Ela está pronta para ser acionada!

Como Acionar:

O Acionamento deve obedecer os seguintes passos:

- 1) Determine o sentido de rotação através de sinal lógico nos pinos 1 e 2 para o Motor 1 e 7 e 8 para o Motor 2, do conector CON1.
- 2) Habilite o acionamento impondo o sinal lógico adequado nos pinos 5 e 6 para o Motor 1 e 11 e 12 para o Motor 2, do conector CON1
- 3) Para o motor rotacionar basta aplicar pulsos de clock. Para o motor 1 utilize os pinos 5 e 6 e para o Motor 2, os pinos 9 e 10 do conector CON1. Para cada descida do pulso de clock um passo será realizado pelo motor.
- 4) Para reverter o sentido de rotação é necessário primeiro desabilitar o motor, para em seguida determinar o outro sentido de rotação.



Title	Size	Number	Rev
	A3		
Drawn by	Doile	Sheet	of
	Fluorene		

ANEXO D

Placa de aquisição

Módulo de AQUISIÇÃO e PROCESSAMENTO DE SINAIS

DE ULTRA-SOM (APDS)

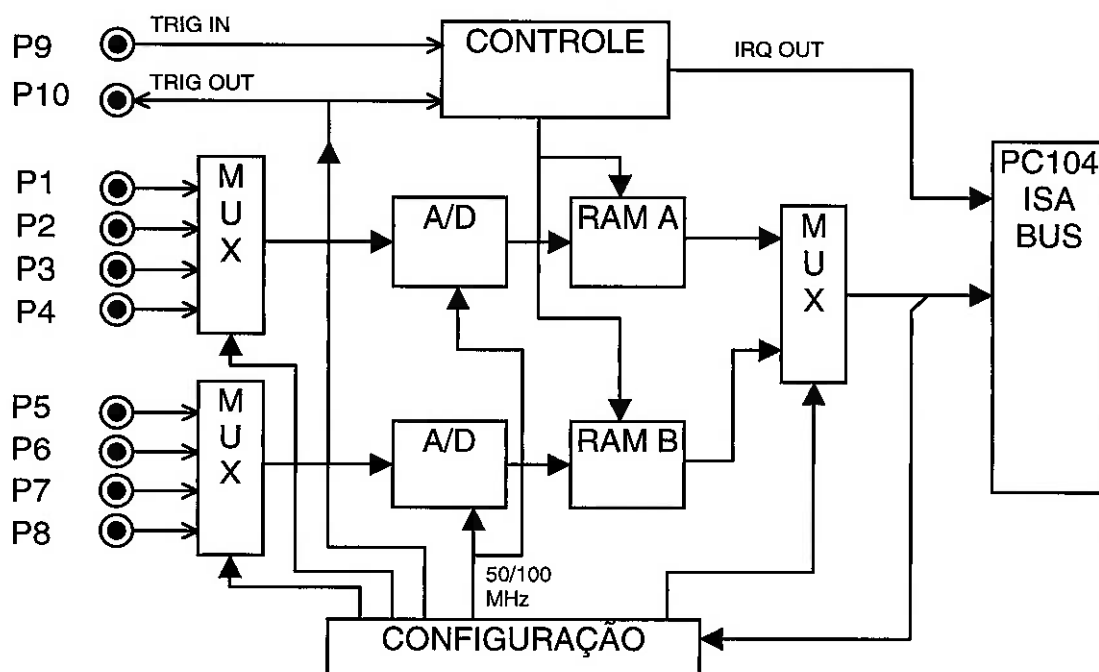
Rev. 3 - Maio de 2006

Descrição do Projeto

O circuito desenvolvido tem por finalidade a digitalização de transientes, com alta taxa de amostragem, de forma a ser incorporado em um sistema padrão PC-104.

O circuito inclui detectores de pico para cada canal, com possibilidade de definir a janela de aquisição e de detecção de pico.

A figura abaixo apresenta um diagrama de blocos do circuito desenvolvido.



Especificações do Sistema

Especificações Elétricas

1. Taxa de Amostragem: 50 ou 100 MHz, configurável
2. Resolução: 8 bits
3. Número de Canais: 8 entradas, divididas em 2 bancos de 4 entradas, com aquisição simultânea de 2 canais (1 de cada banco)
4. Impedância de entrada: 50 Ohms
5. Tensão de entrada para fundo de escala: 2 Volts pico a pico, acoplamento CC
6. Memória de aquisição: até 8191 amostras por canal, 8 bits por amostra

7. Tempo de aquisição: 163 μ s (50 MHz) ou 82 μ s (100 MHz)
8. Trigger selecionável: externo, por borda de subida ou descida, ou por software
9. Alimentação: + 5Vcc, -5 Vcc (do conector PC-104)

Especificações Mecânicas

Dimensões da placa: 96 x 91 mm (formato PC-104)
 Dimensões totais: 110 x 96 x 24 mm (incluindo conectores)
 Conectores: SMA fêmea (entradas e sincronismos)

Principais Parâmetros para Aquisição e Processamento

- DELAY: atraso entre o instante de *trigger* e aquisição, de 0 a 65535 amostras
- SIZE: número de amostras digitalizadas, de 0 a 8191 amostras

O módulo contém detectores de pico especializados para o processamento de sinais de ultra-som em modo pulso-eco e medida de espessura de materiais. A habilitação dos detectores é controlada por meio dos seguintes parâmetros

- DTIME1: tempo morto entre início da aquisição e ativação do detector do Primeiro Pico
- PTIME: tempo de atuação dos sistemas de detecção de pico
- DTIME2: tempo morto entre o Primeiro Pico e ativação do detector do Segundo Pico

Primeiro e Segundo Pico

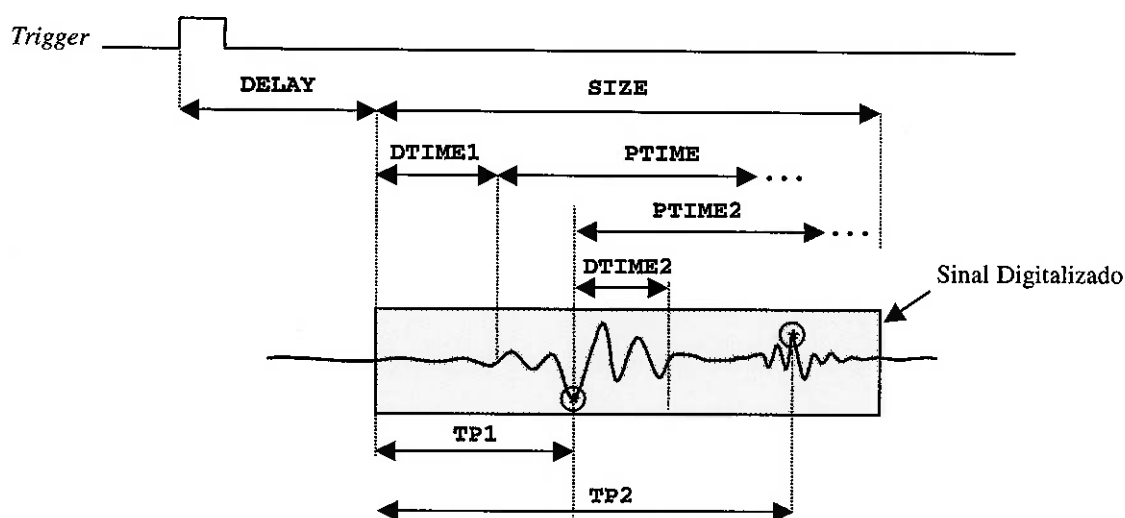
O módulo procura estimar o instante de chegada do primeiro e segundo eco, tomando por base a amplitude do sinal.

Define-se como “Primeiro Pico” a maior amplitude encontrada dentro de uma janela de tempo de detecção, denominada PTIME. Considera-se assim que o primeiro eco, gerado pela primeira interface, terá a maior intensidade em meio ao sinal.

O “Segundo Pico” é definido como a maior amplitude de sinal encontrada após a detecção do primeiro pico. Deve-se configurar DTIME2 convenientemente para evitar que o segundo pico seja erroneamente apontado ainda dentro do sinal do primeiro eco.

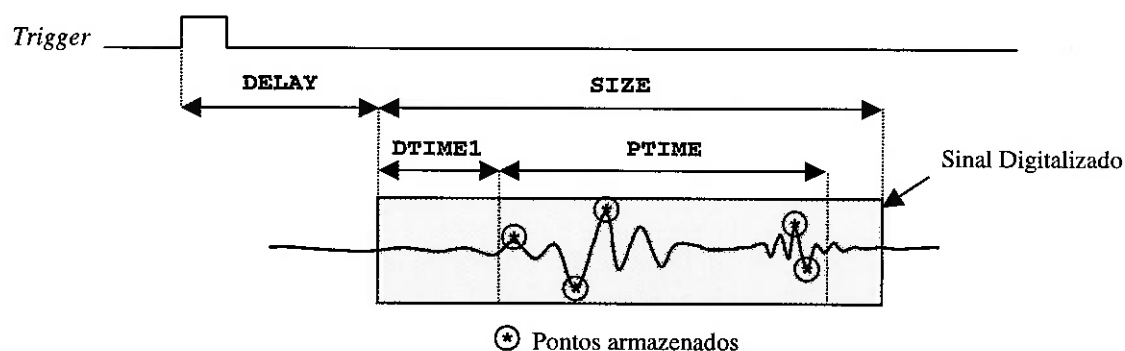
A polaridade do Primeiro Pico (negativa ou positiva) é selecionável, assim como do Segundo Pico.

A figura a seguir mostra as relações temporais entre o Trigger e os parâmetros de configuração e detecção de pico. Neste exemplo, o Primeiro Pico é negativo e o Segundo Pico é positivo.



Picos da Envoltória

O módulo possui um segundo sistema de detecção que armazena os picos (máximos e mínimos locais) da envoltória do sinal. Para cada pico, são armazenados os instantes de ocorrência e o valor da amplitude do sinal. A figura a seguir ilustra o funcionamento desse detector.



Configuração das Chaves

O circuito possui 8 chaves de configuração (DIP-Switch) que permitem selecionar a linha de interrupção e o endereço base na memória do barramento ISA, através da qual é possível acessar os dados digitalizados (1 banco de cada vez).

S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
----	----	----	----	----	----	----	----

Chaves S1 a S3: Seleção da interrupção alocada

S1	S2	S3	Interrupção
OFF	OFF	OFF	IRQ5
ON	OFF	OFF	IRQ6
OFF	ON	OFF	IRQ7
ON	ON	OFF	IRQ11
OFF	OFF	ON	IRQ12
ON	OFF	ON	IRQ15
OFF	ON	ON	- -
ON	ON	ON	- -

Chave S4: Não utilizada

Chaves S5 a S8: selecionam o endereço base da área mapeada na memória do barramento ISA:

S5	S6	S7	S8	Endereço da RAM
OFF	OFF	OFF	OFF	0C0000 – 0C1FFF (*)
ON	OFF	OFF	OFF	0C4000 – 0C5FFF (*)
OFF	ON	OFF	OFF	0C8000 – 0C7FFF
ON	ON	OFF	OFF	0CC000 – 0CDFFF
OFF	OFF	ON	OFF	0D0000 – 0D1FFF
ON	OFF	ON	OFF	0D4000 – 0D5FFF
OFF	ON	ON	OFF	0D8000 – 0D7FFF
ON	ON	ON	OFF	0DC000 – 0DDFFF
OFF	OFF	OFF	ON	0E0000 – 0E1FFF
ON	OFF	OFF	ON	0E4000 – 0E5FFF
OFF	ON	OFF	ON	0E8000 – 0E7FFF
ON	ON	OFF	ON	0EC000 – 0EDFFF
OFF	OFF	ON	ON	0F0000 – 0F1FFF (*)
ON	OFF	ON	ON	0F4000 – 0F5FFF (*)
OFF	ON	ON	ON	0F8000 – 0F7FFF (*)
ON	ON	ON	ON	0FC000 – 0FDFFF (*)

(*) – Não recomendado

Registadores de Controle e Configuração

O circuito aceita configuração dinâmica através de escrita de bytes ou palavras nas posições descritas na tabela a seguir, dispostas na memória a partir do endereço base selecionado:

Endereço	Nome	Descrição
Base+0x0000	CONFIG_L	Configuração da Amostragem
Base+0x0001	CONFIG_H	Configuração de Acesso à Memória
Base+0x0002	DELAY_L	Atraso entre Trigger e Aquisição (Low)
Base+0x0003	DELAY_H	Idem (High)

Base+0x0004	SIZE_L	Número de amostras digitalizadas (Low)
Base+0x0005	SIZE_H	Idem (High)
Base+0x0006	DTIME1_L	Tempo morto antes da detecção do primeiro pico (Low)
Base+0x0007	DTIME1_H	Idem (High)
Base+0x0008	PTIME_L	Tempo em que a detecção do primeiro pico é ativa (Low)
Base+0x0009	PTIME_H	Idem (High)
Base+0x000A	DTIME2_L	Tempo morto após a detecção do primeiro pico (Low)
Base+0x000B	DTIME2_H	Idem (High)
Base+0x000C	PTIME2_L	Tempo após a detecção do primeiro pico em que a detecção do segundo pico é ativa (Low)
Base+0x000D	PTIME2_H	Idem (High)
Base+0x000E	CLEAR_FF	Zera flip-flops IRQ e TRIGGERED (ao se escrever 1 neste reg.)

Configuração de Amostragem e Acesso aos Dados

Nome: CONFIG_L			Endereço: Base+0x0000				
D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0

Função dos bits individuais do byte de configuração:

Bit	Nome	Função
D7	Trig_Out	Transição de 0 para 1 dispara aquisição (trigger interno)
D6	IRQ_Enable	1 = habilita IRQ ao final da aquisição
D5	SEL3	Seleciona MUX banco B
D4	SEL2	Idem
D3	SEL1	Seleciona MUX banco A
D2	SEL0	Idem
D1	FREQ	Seleciona taxa de amostragem; 0= 50 MHz 1= 100 MHz
D0	AD_Enable	0= Desliga clock do A/D para reduzir consumo; 1 = habilita A/D

Bits de seleção de entradas para o canal A do conversor A/D:

SEL1	SEL0	Canal selecionado no Banco A
0	0	Entrada P1
0	1	Entrada P2
1	0	Entrada P3
1	1	Entrada P4

Bits de seleção de entradas para o canal B do conversor A/D:

SEL3	SEL2	Canal selecionado no Banco B
0	0	Entrada P5
0	1	Entrada P6
1	0	Entrada P7
1	1	Entrada P8

Nome: CONFIG_H			Endereço: Base+0x0001				
D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0

Função dos bits individuais do byte de configuração:

Bit	Nome	Função
D7	Trig_Sel	0 = Software, via CONFIG_L[7]; 1 = entrada TrigIn
D6	Edge_Sel	Borda de TrigIn: 0 = subida; 1 = descida
D5	Peak2_Sel	Polaridade do segundo pico: 0 = positivo; 1 = negativo
D4	Peak1_Sel	Polaridade do primeiro pico: 0 = negativo; 1 = positivo
D3- D2	----	Não usados
D1	BANK1	Seleciona banco lido via RAM
D0	BANK0	Idem

Bits de seleção de banco lido:

BANK1	BANK0	Dados acessados a partir de Base+0x0000
0	0	Banco A
0	1	Banco B
1	0	Detectores de Pico do Banco A
1	1	Detectores de Pico do Banco B

Atraso entre Trigger e Aquisição

Nome: DELAY_L			Endereço: Base+0x0002				
D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
Nome: DELAY_H			Endereço: Base+0x0003				
D15	D14	D13	D12	D11	D10	D9	D8

DELAY_H/L define o atraso entre o trigger (externo ou interno) e o início da aquisição, dado em ciclos de clock (20 ns ou 10 ns). Pode variar de 0 a 1310 μ s (50 MHz) ou de 0 a 655 μ s (100 MHz).

Número de Amostras Digitalizadas

Nome: SIZE_L			Endereço: Base+0x0004				
D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
Nome: SIZE_H			Endereço: Base+0x0005				
0	0	0	D12	D11	D10	D9	D8

SIZE_H/L + 1 define a quantidade de amostras digitalizadas, podendo variar de 1 a 8192 amostras (válido para os bancos A e B).

Tempo Morto Antes da Detecção do Primeiro Pico

Nome: DTIME1_L	Endereço: Base+0x0006
----------------	-----------------------

D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
Nome: DTIME1_H			Endereço: Base+0x0007				
0	0	0	D12	D11	D10	D9	D8

DTIME1_H/L define a quantidade de amostras que são ignoradas, após iniciada a aquisição, antes dos detectores de pico serem ativados. Pode variar de 0 a 8191 amostras.

Tempo de Atuação dos Detectores de Pico

Nome: PTIME_L			Endereço: Base+0x0008				
D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
Nome: PTIME_H			Endereço: Base+0x0009				
0	0	0	D12	D11	D10	D9	D8

PTIME_H/L define a quantidade de amostras, após terminado o tempo morto DTIME1, que são utilizadas para detecção dos picos 1 e 2. Pode variar de 0 a 8191 amostras; porém, caso **DTIME1 + PTIME > SIZE**, a detecção de pico é encerrada na última amostra adquirida, conforme definido por **SIZE**.

Acesso aos Registradores dos Detectores de Pico

Os registradores de detecção de pico são acessíveis a partir do endereço Base quando o bit **BANK1** (no byte de configuração **CONFIG_H**) é igual a 1. O bit **BANK0** seleciona o canal a ser lido (0: canal A; 1: canal B)

Os endereços e os valores lidos são listados na tabela a seguir:

Endereço	Nome	Descrição
Base+0x0000	TP1_L	Instante de Ocorrência do Primeiro Pico (Low)
Base+0x0001	TP1_H	Idem (High)
Base+0x0002	P1_L	Valor do Primeiro Pico (Low)
Base+0x0003	P1_H	Idem (High)
Base+0x0004	TP2_L	Instante de Ocorrência do Segundo Pico (Low)
Base+0x0005	TP2_H	Idem (High)
Base+0x0006	P2_L	Valor do Segundo Pico (Low)
Base+0x0007	P2_H	Idem (High)
Base+0x0008	NP_L	Número de Picos de Envoltória armazenados (Low)
Base+0x0009	NP_H	Idem (High)

A partir do endereço Base+0x0400 (offset 1024, em decimal), encontram-se os picos (positivos e negativos) da envoltória, ordenados pelo instante de ocorrência. O número de picos de envoltória armazenados é dado pelo registrador NP, de 16 bits (bytes 8 e 9). A informação referente a cada pico ocupa uma estruturas de 4 bytes, descrita a seguir.

Endereço	Nome	Descrição
Base+0x0400	TEP_L	Instante de Ocorrência do Pico de Envoltória 1 (Low)
Base+0x0401	TEP_H	Idem (High)

Base+0x0402	EP_L	Valor do pico de envoltória 1 (Low)
Base+0x0403	EP_H	Idem (High)
etc		

Os instantes de ocorrência dos picos são dados em número de amostras após **DEL**