

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE
MINAS GERAIS**
CAMPUS DIVINÓPOLIS
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA

Denis Nogueira Viana

**Automação de ensaio do sistema de estacionamento
assistido baseado em sensores ultrassônicos**

Divinópolis

2017

Denis Nogueira Viana

**Automação de ensaio do sistema de estacionamento assistido
baseado em sensores ultrassônicos**

Monografia de Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à comissão avaliadora do curso de Graduação em Engenharia Mecatrônica como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Engenheiro Mecatrônico. Áreas de integração: Mecânica, Controle e Programação.

Orientador: Prof. Dr. Christian Gonçalves Herrera.

Co-orientador: Prof. Me. Juliano de Barros Veloso e Lima.

Divinópolis

2017



Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
CEFET-MG / Campus Divinópolis
Curso de Engenharia Mecatrônica

Monografia intitulada “*Automação de ensaio do sistema de estacionamento assistido baseado em sensores ultrassônicos*”, de autoria do graduando Denis Nogueira Viana, aprovada pela banca examinadora constituída pelos seguintes professores:

Prof. Dr. Christian Gonçalves Herrera
CEFET-MG / Campus Divinópolis - Orientador

Prof. Me. Marlon Antônio Pinheiro
CEFET-MG / Campus Divinópolis

Prof. Dr. Luís Filipe Pereira Silva
CEFET-MG / Campus Divinópolis

Prof. Dr. Lúcio Flávio Santos Patrício
Coordenador do Curso de Engenharia Mecatrônica
CEFET-MG / Campus Divinópolis

Divinópolis

2017

Dedico este trabalho ao meus pais e familiares, que não mediram esforços para me apoiar nesta conquista.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente minha família, que esteve sempre ao meu lado, me incentivando e me dando força. Aos meus orientadores Christian Herrera e Juliano Veloso, sempre solícitos e prestativos, cujas sugestões me levaram a caminhos menos tortuosos. Ao prof. Christian particularmente por propiciar a oportunidade de realizar este projeto. Sou grato também aos professores Renato Dâmaso, Eduardo Habib e José Maurício pelos ensinamentos e pela paciência. Aos laboratoristas Henderson Soares e Matheus Rocha pela ajuda na confecção do projeto. Por fim, agradeço aos meus colegas de curso que, mesmo atarefados, doaram um pouco de seu tempo para tirar minhas dúvidas, propor soluções melhores, contribuindo para a concretização deste trabalho. Muito obrigado!

RESUMO

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) tem por objetivo o desenvolvimento de um equipamento para automatizar um dos ensaios de validação do sistema de estacionamento assistido. Esse sistema visa advertir o motorista sobre a proximidade do veículo em relação a um obstáculo na pista durante as manobras de estacionamento. A distância do carro ao obstáculo é informada ao usuário por um alerta sonoro intermitente com certa frequência. O ensaio que se propõe automatizar verifica se o sistema consegue medir a distância de um obstáculo corretamente em qualquer ponto da área coberta pelos sensores ultrassônicos. Esse ensaio é composto por tarefas simples e altamente repetitivas, e é realizado manualmente em algumas montadoras de automóveis. A automação dessas tarefas traria benefícios como a economia de tempo e a confiabilidade dos resultados. O equipamento construído consiste em uma mesa de coordenadas cartesianas xy para realizar o posicionamento do anteparo atrás do veículo, e um programa de computador para controlar o dispositivo e processar o sinal sonoro. A mesa xy é atuada por motores de passo através de um sistema de correia e polias. O programa, desenvolvido no LabVIEW, controla os motores por meio de uma placa Arduino Uno R3. O sistema construído apresentou precisão de posicionamento, facilidade de uso, e confiabilidade na medição da frequência do alerta intermitente.

Palavras-chave: Automação. Controle numérico computadorizado. Controle de qualidade. Sistemas de auxílio ao motorista.

ABSTRACT

This undergraduate thesis aims to design an equipment to automate one of the validation tests of the parking assist system. The goal of this system is to warn the driver of the proximity of the vehicle to obstacles on the road during parking maneuvers. The distance from the car to the obstacle is informed to the user by means of an intermittent sound signal with a certain frequency. The test to be automated is the one which verifies if the system can measure the distance of an obstacle correctly in any point in the area covered by the ultrasound sensors. It is composed of simple but highly repetitive tasks, and is performed manually by some automakers. Automating these tasks would provide time savings and reliability of results. The machine built consists of a xy table to perform the positioning of the obstacle behind the vehicle, and a computer program to control the device and analyze the sound signal. The table is actuated by stepper motors through a belt drive. The program developed in LabVIEW controls the motors using an Arduino Uno R3 board. The equipment built showed precision in positioning, ease of use and reliability on the measurement of the warning signal frequency.

Keywords: Automation. Computer numerical control. Quality control. Driver Assistance System.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Diagrama do processo de modulação em amplitude DSB. Adaptado de Lathi (2007).	4
Figura 2.2 – Sinais modulante (acima) e modulado (abaixo) nos domínios do tempo (à esquerda) e frequência (à direita). Adaptado de Lathi (2007)	5
Figura 2.3 – Diagrama de blocos do detector de envelope de lei quadrática. Adaptado de Tretter (2008)	6
Figura 2.4 – Motor de passo de relutância variável (BOLTON, 2010)	7
Figura 2.5 - Curva característica de um motor de passo (BOLTON, 2010)	8
Figura 2.6 - a) Motor de passo bipolar. b) Circuito ponte H para acionamento de motores bipolares (BOLTON, 2010)	9
Figura 3.1 - Localização da área de posicionamento e sistema de coordenadas.	10
Figura 3.2 – Ilustração do sistema mecânico da mesa xy.	11
Figura 3.3 – Acopladores de correia.	12
Figura 3.4 – Motor de passo Saehan modelo 2S39Q.	13
Figura 3.5 - Peça de fixação do anteparo ao carro de translação Y	13
Figura 3.6 – Driver Pololu A4988 (POLOLU, 2017)	14
Figura 3.7 - Diagrama de blocos do CI Allegro A4988 (ALLEGRO, 2014)	14
Figura 3.8 - Diagrama do circuito do driver Pololu A4988 (POLOLU, 2017)	15
Figura 3.9 – Conexões externas do driver A4988 (POLOLU, 2017)	16
Figura 3.10 – Interface gráfica do usuário do software de controle da mesa xy.	17
Figura 3.11– Menu <i>Options</i> do programa de controle da mesa xy.	18
Figura 3.12 – Aba <i>Audio</i> do menu <i>Options</i> do programa de controle da mesa xy.	18
Figura 3.13 – protocolo de comunicação serial convencional neste trabalho.	19
Figura 3.14 – Fluxograma do algoritmo de processamento de áudio.	21

Figura 3.15 – Trem de pulsos retangulares (acima), portadora (no meio), e sinal de áudio (em baixo)	22
Figura 3.16 – Espectro do trem de pulsos retangulares deslocado por f_0 devido à modulação.	22
Figura 3.17 – Mensagem de erro gerada pelo algoritmo de processamento de áudio. .	23
Figura 4.1 - Medidas, em cm, para conferir alinhamento da mesa xy.	25
Figura 4.2 – Código LabVIEW do teste do sistema de áudio.	26
Figura 4.3 – Resultado do teste do sistema de áudio.	27
Figura 4.4 – Foto da mesa xy posicionada atrás de um veículo para execução do teste do sistema completo.	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Resolução do micropasso conforme combinação dos estados dos pinos MS1 MS2 e MS3.15
Tabela 3.2 - Recursos necessários.24
Tabela 4.1 – Validação do sistema de posicionamento da mesa xy.	25

LISTA DE NOTAÇÕES E ACRÔNIMOS

Letras Latinas

a	Aceleração máxima desejada para o carro de translação
B	Largura de faixa do sinal modulante, em Hz
d	Diâmetro do trecho do eixo, em mm
E	Módulo de elasticidade longitudinal do material
F	Força de tração sobre o carro ou a tensão na correia
F_{at}	Força de atrito máxima sofrida pela carga
f_0	Frequência da portadora, em Hz
g	Aceleração da gravidade
$I_{TripMAX}$	Valor de corrente limitado pelo <i>driver</i> do motor de passo
I	Momento de inércia total do sistema
I_L	Momento de inércia da carga
I_P	Somatório dos momentos de inércia das polias
I_C	Momento de inércia da correia
I_M	Momento de inércia do motor
I_x	Momento de inércia da seção transversal em relação à linha neutra
K_f	Ceficiente de flexão
K_t	Coeficiente de torção
K_S	Fator de segurança (valor de referência de 1,5 a 2,0)
L	Comprimento da guia linear
M_f	Momento fletor máximo que ocorre no trecho, em $kgf \cdot mm$
M_t	Momento torçor máximo que ocorre no trecho, em $kgf \cdot mm$
m_B	Massa da correia
m_L	Massa da carga
m_P	Massa da polia
$m(t)$	Sinal modulante ou mensagem
P_m	Potência mecânica necessária à mesa xy
P	Força concentrada atuando em uma guia linear
r	Raio da polia sincronizadora;
R_S	Resistência conectada ao pino SENSE do <i>driver</i>
T_a	Tensão de trabalho da correia
T	Período do trem de pulsos retangulares
V_{REF}	Tensão obtida do potenciômetro como divisor de tensão
$v_{máx}$	Velocidade linear máxima da mesa xy
$y_{máx}$	Deflexão tipo flecha máxima
w	Peso da guia por unidade de comprimento

Letras Gregas

η	Eficiência do sistema de transmissão (de 0,85 a 0,95)
ω_c	Frequência da portadora, em radianos
μ	Coefficiente de atrito cinético das superfícies deslizantes
ρ	Massa específica do material
σ_u	Limite de resistência do material
σ_e	Limite de escoamento do material
σ_f	Tensão admissível final, em kgf/mm^2
τ	Tempo de duração dos pulsos da onda quadrada
τ_m	Torque gerado pelo motor
τ_a	Torque de aceleração
τ_L	Torque de carga

Acrônimos

DSB	Faixa lateral dupla (<i>double sideband</i>)
CI	Circuito integrado
USB	Universal Serial Bus
CAD	<i>Computer Aided Design</i>

SUMÁRIO

1-	INTRODUÇÃO	1
1.1-	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA.....	1
1.2-	MOTIVAÇÃO.....	2
1.3-	OBJETIVO GERAL	2
1.4-	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
2-	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	4
2.1-	MODULAÇÃO EM AMPLITUDE.....	4
2.2-	MOTORES DE PASSO.....	6
3-	METODOLOGIA	10
3.1-	PRÉ-REQUISITOS DO PROJETO.....	10
3.2-	PARTE MECÂNICA	10
3.3-	PARTE ELETRÔNICA	14
3.4-	SOFTWARE.....	16
3.4.1-	INTERFACE E FUNCIONAMENTO GERAL DO PROGRAMA	16
3.4.2-	PROTOCOLO DE COMUNICAÇÃO SERIAL.....	19
3.4.3-	ALGORITMO DO PROCESSAMENTO DE ÁUDIO	19
3.5-	RECURSOS FÍSICOS E CUSTOS.....	24
4-	RESULTADOS E DISCUSSÕES	25
4.1-	VALIDAÇÃO DO SISTEMA DE ÁUDIO.....	26
4.2-	VALIDAÇÃO DO SISTEMA DE COMPLETO	27
5-	CONCLUSÃO	29
6-	PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....	30
7-	REFERÊNCIAS.....	31
8-	APÊNDICE.....	33
8.1-	APÊNDICE A – CÓDIGO DO SOFTWARE NO LABVIEW	33
8.2-	APÊNDICE B – CÓDIGO DO SOFTWARE NO ARDUINO	36
8.3-	APÊNDICE C – MODELO DA PARTE MECÂNICA DA MESA XY NO SOLIDWORKS 41	
8.4-	APÊNDICE D – DIMENSIONAMENTO DAS GUIAS LINEARES.....	46
8.5-	APÊNDICE E – ESPECIFICAÇÃO DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO POR POLIAS E CORREIAS.....	49
8.6-	APÊNDICE F – ESPECIFICAÇÃO DOS MOTORES DE PASSO.....	51

1- INTRODUÇÃO

1.1-DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

No ambiente industrial dos mais diversos setores, os processos produtivos são desenvolvidos para que os bens fabricados saiam conforme planejado. Mas para que as características dos produtos continuem satisfatórias ao longo do tempo é necessário medir os resultados da produção periodicamente (validação) e recalibrar os processos. A validação assegura, através de resultados de testes amostrais, que todos os produtos possuem qualidade, ou seja, que estão de acordo com as especificações (OLIVEIRA, 2004). Na indústria automobilística, por exemplo, há que se verificar o funcionamento das luzes de alerta no painel do carro, a durabilidade do veículo sob cargas cíclicas, e se o cinto de segurança não irá soltar durante uma frenagem.

Um sistema automotivo relativamente novo e que vem se tornando cada vez mais comum nos veículos é o sistema de estacionamento assistido (Park assist system). Esse sistema tem por objetivo advertir o motorista da proximidade do veículo em relação a obstáculos na pista durante as manobras de estacionamento. Ele é composto por 4 sensores ultrassônicos, instalados nos para-choques traseiros, uma unidade de controle eletrônica (ECU) e um alto-falante. O engate da marcha à ré habilita o estacionamento assistido. Quando um obstáculo entra na zona de alcance dos sensores, sua distância é informada ao usuário por um sinal sonoro intermitente. Quanto mais próximo o carro estiver do obstáculo, maior será a frequência dos pulsos, até que, a determinada distância, o sinal se torna contínuo.

Para a completa validação desse sistema é necessário realizar vários testes, como o de qualidade do som produzido pelo altofalante e o do funcionamento correto da central eletrônica. O que se propõe automatizar é o ensaio de mapeamento da área coberta pelos sensores, que é descrito a seguir. Primeiramente um exemplar de veículo recém-fabricado é levado ao laboratório de testes. Um anteparo é posicionado em determinado ponto na vizinhança do para-choque, simulando um obstáculo na pista, o que dispara o sinal sonoro. As coordenadas do ponto em relação ao carro, e a frequência e tipo do som emitido (intermitente ou contínuo) são registrados. Esse procedimento é repetido para centenas de outros pontos. Ao final, os dados obtidos são arranjados em um mapa de cores, e aferidos em relação a um padrão para definir se o sistema passou no teste.

Atualmente, algumas montadoras realizam esse ensaio de forma manual quanto ao posicionamento do anteparo, cálculo da frequência e registro dos dados. Isso requer que um funcionário dedique seu tempo exclusivamente ao teste, podendo gastar até 4 horas para completá-lo. Dependendo do carro, quantidades tão grandes quanto 500 pontos são necessários. O problema consiste, portanto, na realização de tarefas simples e repetitivas.

1.2-MOTIVAÇÃO

O uso de máquinas para substituir o homem nesse caso é altamente vantajoso. O teste automatizado exigiria um equipamento simples e com baixo custo (inicial, de manutenção e de operação). Seria mais eficiente e preciso, além de proporcionar maior confiabilidade dos resultados. O engenheiro poderia dedicar-se então às atividades de maior valor para a empresa, aquelas que as máquinas ainda não podem fazer, como por exemplo propor uma melhoria para um processo empresarial.

Outro ponto forte em favor deste projeto é que a presença do sistema de estacionamento assistido tende a ser cada vez mais comum nos veículos. De acordo com uma pesquisa realizada pelo Centro de Tecnologia Allianz (AZT) e pela Continental AG, após a análise de cerca de 3500 casos, “cerca de 40% dos acidentes veiculares que resultam em perdas ou danos materiais ocorrem ao manobrar ou estacionar o carro.” A frequência desse tipo de acidente aumentou 30% na última década. Esse aumento se deve em parte ao crescimento da urbanização e ao aumento do tamanho dos veículos (largura, altura e comprimento), enquanto o tamanho da vagas de estacionamento permaneceu o mesmo. Além disso, a visibilidade do motorista foi substancialmente reduzida como resultado de alterações na estrutura e design dos veículos (NETO, 2017).

1.3-OBJETIVO GERAL

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) tem por objetivo o desenvolvimento de um equipamento para automatizar o ensaio de mapeamento da área de cobertura do sistema de estacionamento assistido baseado em sensores ultrassônicos. Essa ideia foi concebida pelo prof. Dr. Christian Herrera.

1.4- OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Identificar os requisitos do sistema;
2. Escolher máquina de posicionamento adequada;

3. Desenvolver o projeto mecânico, eletrônico e de software do equipamento;
4. Construir um protótipo e validá-lo.

2- FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1-MODULAÇÃO EM AMPLITUDE

O propósito da modulação é condicionar uma mensagem $m(t)$ para poder transmiti-la por um meio de comunicação como, por exemplo, a radiodifusão. Uma das vantagens da modulação é que ela permite a transmissão de vários sinais em um mesma mídia de transmissão sem que haja interferência entre eles (LATHI, 2007).

Na modulação em amplitude, a mensagem, ou sinal modulante, é transmitida através do sinal modulado, uma senóide de frequência e fase constantes e amplitude variável. A informação é carregada pela amplitude do sinal modulado, que varia de alguma forma em relação ao sinal modulante.

Se a amplitude do sinal modulado for diretamente proporcional ao sinal modulante, ocorre a modulação em faixa lateral dupla (DSB), ilustrada no diagrama da Figura 2.1.

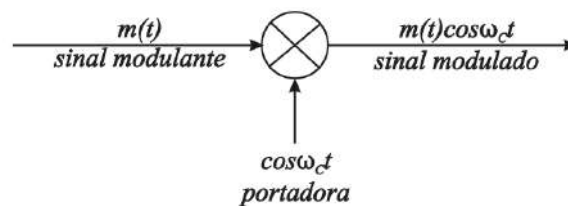


Figura 2.1 – Diagrama do processo de modulação em amplitude DSB. Adaptado de Lathi (2007).

A senóide pura é chamada de portadora, de frequência ω_c . O sinal modulante é multiplicado no tempo pela portadora para obter o sinal modulado. A Figura 2.2 mostra ambos os sinais modulante e modulado nos domínios do tempo e da frequência.

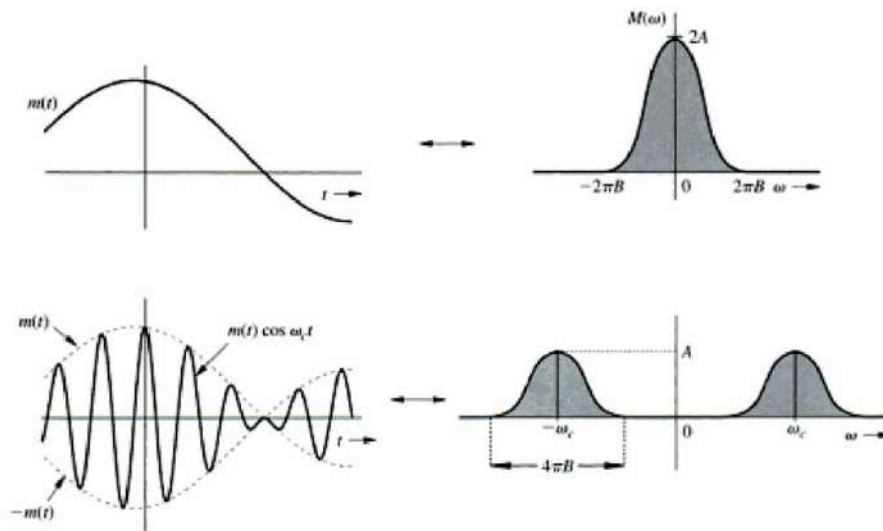


Figura 2.2 – Sinais modulante (acima) e modulado (abaixo) nos domínios do tempo (à esquerda) e frequência (à direita). Adaptado de Lathi (2007).

Pela propriedade de deslocamento na frequência, é possível demonstrar que essa modulação desloca o espectro de $m(t)$ para a esquerda e para a direita por ω_c e o divide pela metade. A Figura 2.2 mostra que $\omega_c \geq 2\pi B$ para que não haja sobreposição dos espectros centrados em $\pm\omega_c$. Caso contrário, a informação de $m(t)$ será perdida no processo de modulação, o que tornará impossível a recuperação da mensagem a partir sinal modulado. B é a largura de faixa de $m(t)$ em Hz . A linha tracejada que acompanha $m(t)$ no gráfico do sinal modulado é chamada de envelope.

DEMODULAÇÃO POR DETECÇÃO DE ENVELOPE

O processo de recuperar o sinal original do sinal modulado é chamado de demodulação. No caso especial em que $m(t) \geq 0$ para todos os valores de t , o sinal original pode ser recuperado por um processo extremamente simples e barato chamado detecção de envelope. Um detector de envelope apresenta em sua saída o envelope, ou envoltória, do sinal de entrada. Rádios comerciais usam um circuito analógico para esse fim, composto de um diodo, capacitor e resistores para seguir os picos positivos do sinal modulado (TRETTER, 2008). Um método de detecção de envelope conveniente para o processamento digital é a detecção de lei quadrática. O diagrama de blocos do detector de lei quadrática é mostrado na Figura 2.3. Será assumido que o sinal modulante é um sinal passa-baixa.

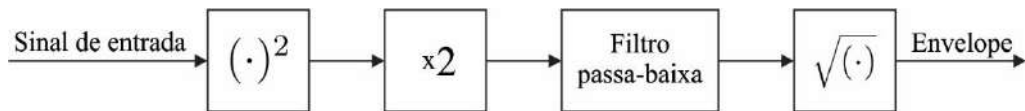


Figura 2.3 – Diagrama de blocos do detector de envelope de lei quadrática. Adaptado de Tretter (2008).

A primeira etapa desse detector consiste em elevar ao quadrado a amplitude do sinal modulado, resultando no sinal

$$m(t)^2 \cos^2 \omega_c t = \frac{1}{2} m(t)^2 + \frac{1}{2} m(t)^2 \cos 2\omega_c t$$

O primeiro termo do lado direito da equação é um sinal passa-baixa com largura de faixa $2B \text{ Hz}$. O segundo termo possui espectro centrado em $\pm 2\omega_c$ com largura de faixa de $4B \text{ Hz}$. Para que o detector quadrático funcione apropriadamente, os espectros desses dois termos não podem se sobrepor. Essa condição é satisfeita quando $\omega_c \geq 4\pi B$.

A taxa de amostragem para implementar o detector quadrático por técnicas de processamento digital depende não apenas do espectro do sinal de entrada, como também do espectro do sinal após o processamento. Como a frequência máxima do sinal após elevar ao quadrado é $2\omega_c + 4\pi B$ radianos, o sinal modulado (entrada) deve ser amostrado a uma taxa de pelo menos $2(2\omega_c + 4\pi B)$ radianos para evitar *aliasing*. O filtro passa-baixa deve ter uma frequência de corte de $2B \text{ Hz}$ de forma que sua saída seja apenas o primeiro termo, $m(t)^2$. A etapa final do processo realiza uma raiz quadrada, resultando no envelope, ou sinal modulante, $m(t)$.

2.2- MOTORES DE PASSO

Motores de passo são motores de corrente contínua que produzem rotação através de movimentos discretos de ângulos iguais, denominados passos, para cada pulso digital em sua entrada (BOLTON, 2010). O esquema interno de um motor de passo de relutância variável é exibido na Figura para ilustrar o princípio de funcionamento dos motores de passo de forma geral.

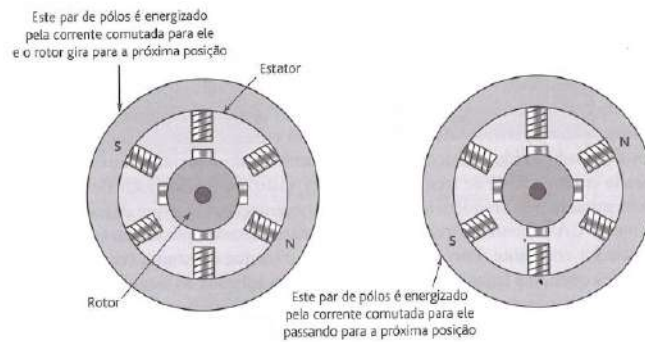


Figura 2.4 – Motor de passo de relutância variável (BOLTON, 2010).

O rotor pode ser feito de material ferromagnético ou ímã, e pode possuir uma ou mais protuberâncias radiais denominadas polos. O estator possui polos formados por eletroímãs. Quando uma bobina, ou um par de bobinas diametralmente opostas, tem corrente circulando, é criado um campo magnético, que tende a atrair e alinhar o polo mais próximo do rotor com os polos do estator, provocando o movimento. Alguns motores tem passos típicos de até $0,9^\circ$. Esses motores são bastante utilizados em aplicações de posicionamento de precisão, como, por exemplo, em acionadores de disco rígido de computador (BOLTON, 2010).

Algumas especificações de motores de passo são listadas a seguir:

Fase. Esse termo se refere ao número de enrolamentos independentes no estator. As especificações de corrente de um motor de passo são muitas vezes expressas por fase.

Ângulo de passo. É o ângulo que o rotor gira quando somente uma bobina é energizada por vez.

Torque de manutenção (*holding torque*). Este é o torque máximo que pode ser aplicado num motor energizado e em repouso sem colocá-lo em movimento.

Torque *pull-in*. Este é o torque máximo aplicado no motor durante a partida a uma determinada taxa de pulsos para garantir que o motor não perca passos.

Torque *pull-out*. Este é o torque máximo que pode ser aplicado no motor depois da partida a uma determinada taxa de pulsos sem que ele perca nenhum passo.

Taxa *pull-in*. Essa é a taxa máxima de pulsos enviados ao motor durante a partida com determinada carga sem que o motor perca passos. Se o motor não perder passos, ou seja, permanecer em sincronismo, a taxa de pulsos será igual à velocidade do motor em passos por segundo.

Taxa pull-out. Essa é a taxa máxima de pulsos enviados ao motor depois da partida com determinada carga sem que o motor perca passos.

Faixa de deslocamento. Esta é a faixa da taxa de pulsos entre a pull-in e pull-out dentro da qual o motor mantém sincronismo, mas não pode partir e nem reverter nessa velocidade para que não saia de sincronismo.

A Figura 2 mostra a curva característica de um motor de passo.

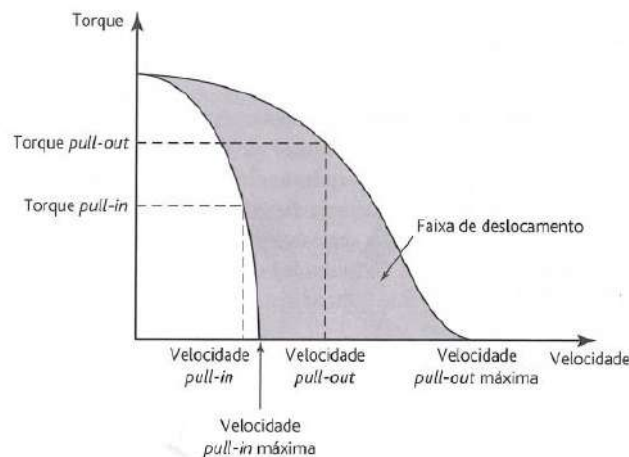


Figura 2.5 - Curva característica de um motor de passo (BOLTON, 2010).

CONTROLE E CIRCUITO DE ACIONAMENTO DO MOTOR DE PASSO

A comutação das bobinas de um motor de passo é realizada através de circuitos eletrônicos utilizando transistores como chaves. Motores de duas fases que possuem quatro fios de conexão são chamados de **motores bipolares** (Figura 2.6a). Os **motores unipolares** por sua vez tem bobinas de fase com derivação central. Dependendo de se as derivações forem interconectadas ou não no interior do motor, 5 ou 6 fios de conexão podem ser observados. Motores bipolares podem ser acionados por um circuito ponte H (Figura 2.6b). Existe uma sequência específica de estados dos transistores da ponte H necessária para colocar o motor em rotação em uma determinada direção. Cada comutação resulta em um passo deslocado. A sequência deve ser repetida em ciclos, e invertida para rotação no sentido contrário.

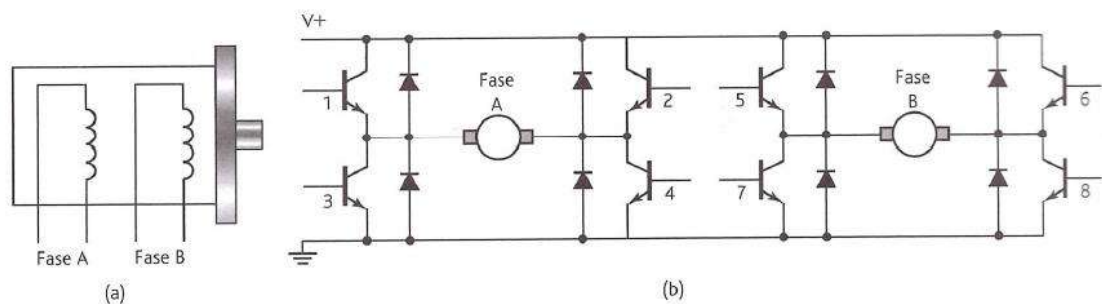


Figura 2.6 - a) Motor de passo bipolar. b) Circuito ponte H para acionamento de motores bipolares (BOLTON, 2010).

Para conseguir resoluções de posicionamento maiores em um motor pode-se usar uma técnica chamada minipasso. Essa técnica consiste em controlar a corrente nas bobinas de forma a posicionar o rotor em ângulos intermediários entre passos normais. Dessa forma, o motor pode girar em incrementos de $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{8}$ e $\frac{1}{16}$ de passo. Existem circuitos integrados que possuem o circuito completo de acionamento dos motores de passo, além de outras funcionalidades como proteção contra sobrecorrente e corrente reversa, acionamento por minipasso, e módulo de lógica interna para simplificar o controle.

3- METODOLOGIA

3.1- PRÉ-REQUISITOS DO PROJETO

O anteparo deve ser um objeto cilíndrico de no mínimo 1 m de comprimento posicionado como um poste. O posicionamento deve ser efetuado em pontos espaçados entre si por 10 cm em disposição reticular, dentro de uma área retangular de 200 x 240 m, totalizando 525 pontos. A área de posicionamento e o sistema de coordenadas está disposto como na Figura 3.1. A origem do sistema é o ponto onde o eixo longitudinal do automóvel intercepta a projeção do para-choque no solo, e o eixo y é tangente ao para-choque nesse ponto. O anteparo deve tocar o solo. O erro máximo admissível para o posicionamento é de 0,5 cm.

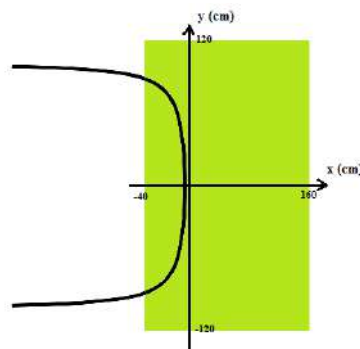


Figura 3.1 - Localização da área de posicionamento e sistema de coordenadas.

O sistema de posicionamento não poderá interferir nas medidas, e deverá ocupar pouco espaço, principalmente quando não estiver em uso. O alerta sonoro possui tom e intensidades diferentes dependendo do veículo.

Como a confecção de uma máquina em tamanho real teria um custo elevado em relação ao orçamento disponível para este projeto, o protótipo foi construído em escala reduzida, permitindo o posicionamento em uma área quadrada de apenas 25 posições.

3.2-PARTE MECÂNICA

Uma rápida investigação foi realizada a fim de descobrir qual arranjo mecânico da máquina de posicionamento seria mais adequado para alcançar os objetivos do projeto. Dentre as opções pesquisadas estavam os robôs móveis autônomos e os robôs paralelos suspensos por cabos. O sistema mecânico escolhido foi a mesa de coordenadas cartesianas xy, pois é um sistema menos complexo e que proporciona maior exatidão e repetibilidade. O equipamento idealizado consiste em uma mesa de

coordenadas cartesianas para realizar o posicionamento do anteparo atrás do veículo, e um programa de computador para controlar o dispositivo, e processar o sinal sonoro. Uma ilustração do protótipo pode ser vista na Figura 3.2. O modelo em CAD da parte mecânica do protótipo encontra-se no Apêndice C.

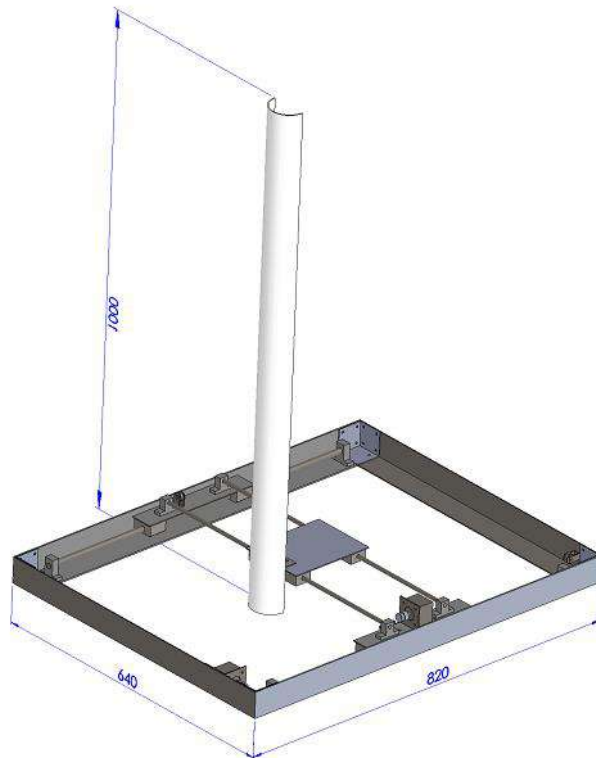


Figura 3.2 – Ilustração do sistema mecânico da mesa xy.

O anteparo é um tubo de PVC rígido de 7,5 cm de diâmetro. Foram empregadas guias lineares retificadas de aço SAe 1045 e rolamentos lineares para garantir a precisão do posicionamento do anteparo. O cálculo do dimensionamento da guias lineares pode ser visto no Apêndice D. O movimento rotacional do motor é convertido em movimento translacional por meio de correias sincronizadoras GT2 de 2 mm de passo e 6 mm de largura. Os critérios de especificação das correias são apresentados no Apêndice E.

As correias são fixadas aos carros de translação por meio dos acopladores de correia (*clamping fixtures*), mostrados na Figura 3.3.

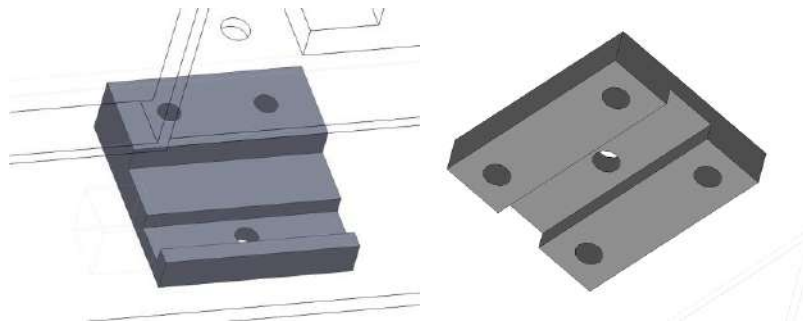


Figura 3.3 – Acopladores de correia.

O acoplador do lado direito está localizado embaixo do carro de translação Y, que carrega o anteparo. Essas peças foram baseadas nos manuais de projeto da Gates Correias. As extremidades da correia são colocadas no sulco da peça e são prensadas por uma chapa que é parafusada logo em cima da correia. De acordo com os manuais, o sulco deve conter ranhuras que se encaixem nos dentes da correia para que ela não solte facilmente. Entretanto, esse recurso não foi empregado neste projeto, uma vez que a tensão à qual as correias são submetidas é muito pequena. O sulco deve ser longo o suficiente para conter no mínimo 6 dentes da correia para que o sistema seja eficiente.

Para a escolha dos atuadores analisou-se entre motores de passo e motores CC. Motores de passo são geralmente preferidos para aplicações que exigem posicionamento preciso, pois possibilitam o posicionamento do eixo do motor em posições angulares com alta resolução e confiabilidade e sem necessidade de utilizar sensores. Além disso, a lógica de acionamento dos motores de passo é bem simples. Os motores de corrente contínua, por sua vez, necessitam de sensores e algoritmos de controle para garantir um posicionamento satisfatório. Como os motores de passo possuem a mesma faixa de preço que motores CC com redução e encoder, o autor preferiu o uso dos motores de passo, para evitar a complexidade do controle de posição. Os cálculos do torque e potência do motores estão detalhados no Apêndice F. Os motores de passo utilizados foram modelo NEMA 17 2S39Q da marca Saehan, com 1,1 kgf-cm de torque em repouso, 1,8° por passo, alimentação de 2,0 V e corrente máxima de 1,2 A (Figura 3.4).



Figura 3.4 – Motor de passo Saehan modelo 2S39Q.

As peças que não foram encontradas no mercado foram fabricadas. Dentre elas, está a peça de fixação do anteparo ao carro de translação (Figura 3.5), as placas de fixação das correias, e os suportes das polias tensoras. O material utilizado foi o aço.



Figura 3.5 - Peça de fixação do anteparo ao carro de translação Y.

A base do protótipo foi feita de cantoneiras de alumínio devido ao fato de que as cantoneiras de aço com as dimensões necessárias para as abas são muito mais pesadas e tem custo bem maior. Como o protótipo ficará contido inteiramente na área de alcance dos sensores, a altura da base precisou ser pequena para não influenciar nas medições.

O tubo de PVC foi cortado longitudinalmente pela metade para facilitar sua fixação à mesa. Essa alteração do anteparo não possui influência na detecção pelos sensores ultrassônicos.

3.3-PARTE ELETRÔNICA

Será usada uma placa eletrônica de prototipagem Arduino Uno R3 para comunicar com o software e comandar os circuito de acionamento (*Drivers*) dos motores de passo. O acionamento dos motores será feito usando o driver mostrado na Figura 3.6 abaixo, baseado no chip A4988 da Allegro.

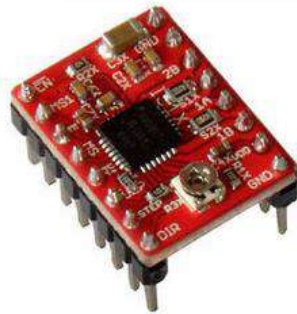


Figura 3.6 – Driver Pololu A4988 (POLOLU, 2017).

O A4988 é um CI projetado para acionar um motor de passo bipolar, em cinco resoluções de posicionamento diferentes (1, $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{8}$ e $\frac{1}{16}$ de passo), podendo fornecer de 8 a 35 V na saída e até 2 A por enrolamento. A Figura 3.7 mostra o diagrama de blocos funcional do chip. O CI possui uma lógica de controle e um tradutor para simplificar o acionamento das duas pontes H. O CI também conta com proteção contra corrente reversa e limitação de corrente, ajustável por um potenciômetro na placa.

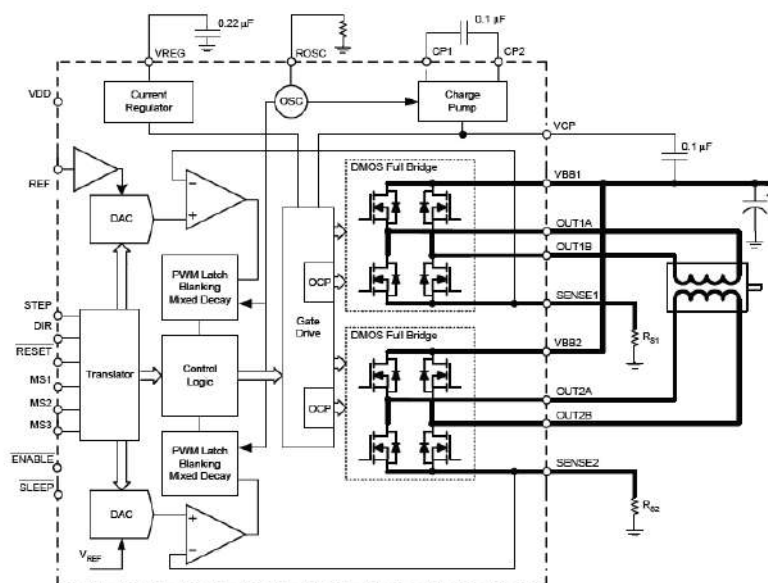


Figura 3.7 - Diagrama de blocos do CI Allegro A4988 (ALLEGRO, 2014).

O circuito eletrônico do driver é ilustrado na Figura 3.8.

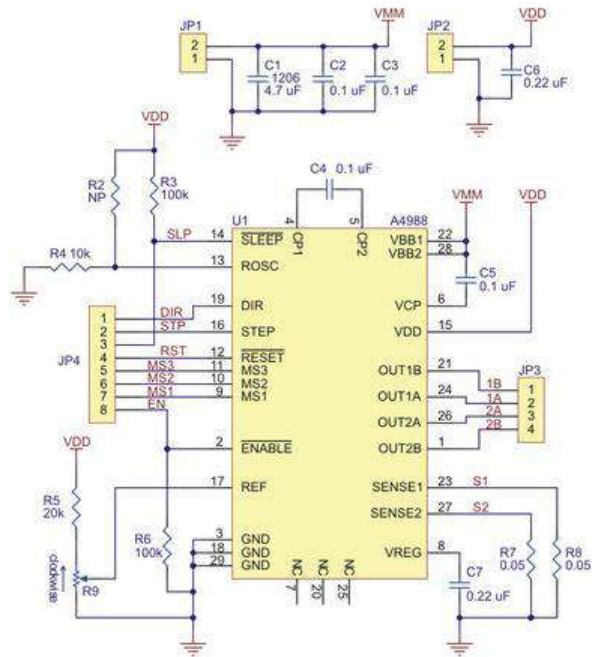


Figura 3.8 - Diagrama do circuito do driver Pololu A4988 (POLOLU, 2017).

A entrada de direção DIR serve para definir o sentido de giro do motor. Mudanças no nível lógico desse pino só tem efeito no próximo incremento no motor. Uma borda de subida na entrada STEP faz o eixo do motor deslocar um incremento. O tamanho do incremento é definido pela combinação de estado dos pinos MS1, MS2 e MS3, conforme sumariza a Tabela 3.1. Como o motor escolhido, de 200 PPR (passos por revolução), possui resolução suficiente para os objetivos deste projeto, os pinos MS1, MS2 e MS3 serão conectados ao terra.

Tabela 3.1 – Resolução do micropasso conforme combinação dos estados dos pinos MS1 MS2 e MS3.

MS1	MS2	MS3	Resolução
Baixo	Baixo	Baixo	Passo Completo
Alto	Baixo	Baixo	Meio Passo
Baixo	Alto	Baixo	¼ De Passo
Alto	Alto	Baixo	1/8 De Passo
Alto	Alto	Alto	1/16 De Passo

Com essa resolução selecionada, cada passo do motor desloca o anteparo em 0,2 mm. O pino ENABLE serve para habilitar e desabilitar a saída para os motores. Quando setado, desabilita as saídas e quando colocado em nível lógico baixo, deixa a habilitação das saídas sob controle da lógica interna.

O valor máximo para o limite de corrente em um enrolamento é estabelecido por (Allegro, 2014)

$$I_{TripMAX} = \frac{V_{REF}}{8R_S} \quad (3.1)$$

em que V_{REF} é a tensão contínua presente no pino REF, e R_S é a resistência do resistor ligado entre o pino SENSE do enrolamento correspondente e o terra, que vale 0,05 ohm. Para limitar a corrente abaixo de 1,2 A por enrolamento, a tensão de referência terá que ser igual a

$$V_{REF} = 1,2 \cdot 8 \cdot 0,05 = 0,23 \text{ V} \quad (3.2)$$

A tensão de referência, e conseqüentemente a corrente-limite, será ajustada através de um resistor variável presente na placa do driver. O pino VDD receberá a tensão de alimentação da parte lógica do circuito, e o pino VMOT, ou VMM, conforme o diagrama da Figura 3.9, receberá a tensão para acionar os motores. Os terminais 1A, 1B, 2A e 2B são conectados nos enrolamentos do motor.

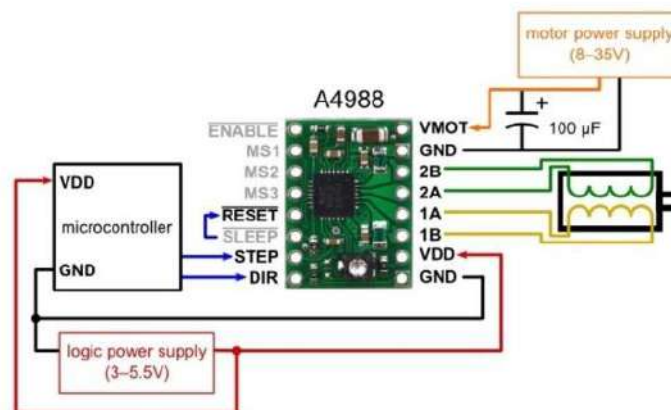


Figura 3.9 – Conexões externas do driver A4988 (POLOLU, 2017).

3.4-SOFTWARE

3.4.1- INTERFACE E FUNCIONAMENTO GERAL DO PROGRAMA

A interface gráfica do usuário pode ser vista na Figura 3.10 . Esse programa é responsável por enviar os comandos de posicionamento e analisar o sinal de áudio. O software foi desenvolvido utilizando o programa LabVIEW 2011. O código do programa se encontra no Apêndice A.

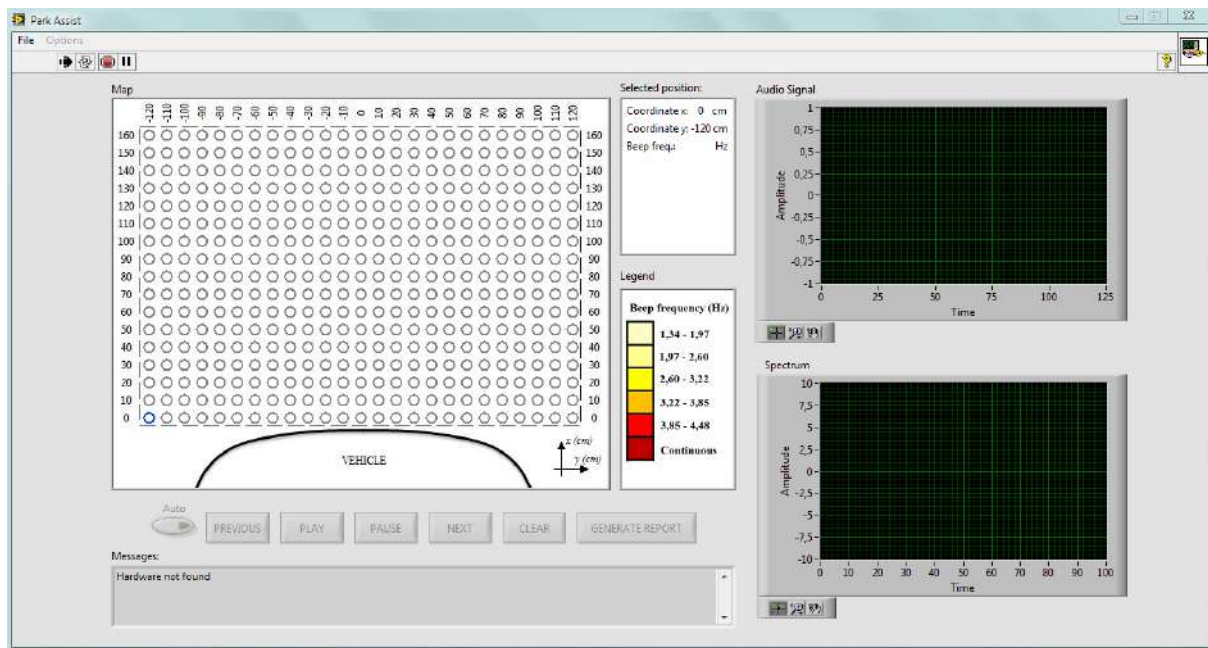


Figura 3.10 – Interface gráfica do usuário do software de controle da mesa xy.

Pode-se ver na Figura o desenho que representa a mesa xy posicionada atrás do veículo. O desenho informa ao usuário qual a posição atual do anteparo. Ele serve também para que o usuário selecione um ponto de sua escolha. Algumas informações do ponto selecionado, como coordenadas e frequência do *beep*, são exibidas na caixa acima da legenda. Abaixo do desenho se encontram os botões de controle do ensaio. O botão *Generate Report* exporta os resultados do ensaio para um arquivo de planilha. Os gráficos à direita exibem o sinal de áudio do ponto selecionado e seu espectro de amplitude.

Ao abrir o programa, a maioria das funções estarão desabilitadas. O usuário tem a opção de criar um novo projeto para realizar um novo ensaio, ou abrir um arquivo de projeto já existente. Essas opções estão listadas no menu *File*. Após selecionar uma dessas opções, as funções da janela são habilitadas.

O programa então se conecta automaticamente com a mesa xy. Algumas configurações podem ser feitas no menu *Options* (Figura 3.11).

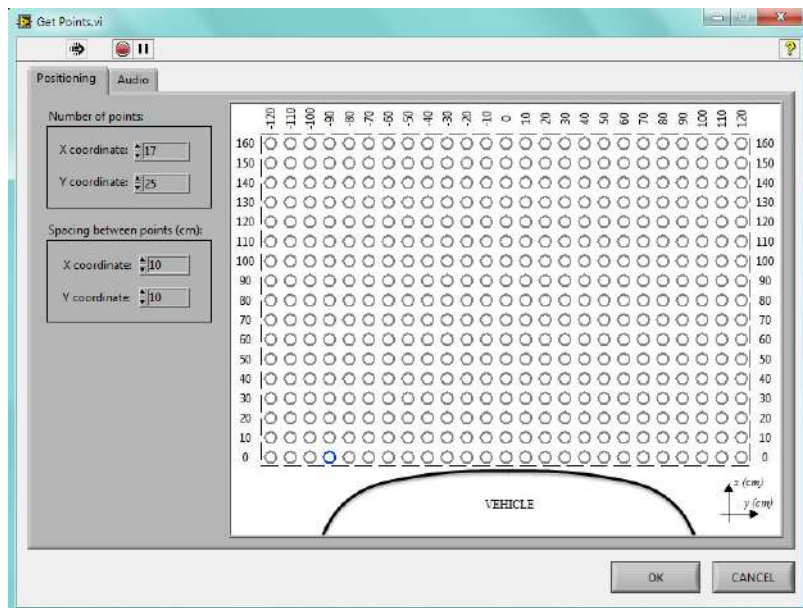


Figura 3.11– Menu *Options* do programa de controle da mesa xy.

Na aba *Positioning*, o usuário deve definir a malha de pontos do ensaio e o espaçamento entre os pontos. Na aba *Audio* (Figura 3.12), o usuário pode selecionar o dispositivo de entrada de áudio, e definir se os arquivos de áudio devem ser salvos na pasta do projeto.

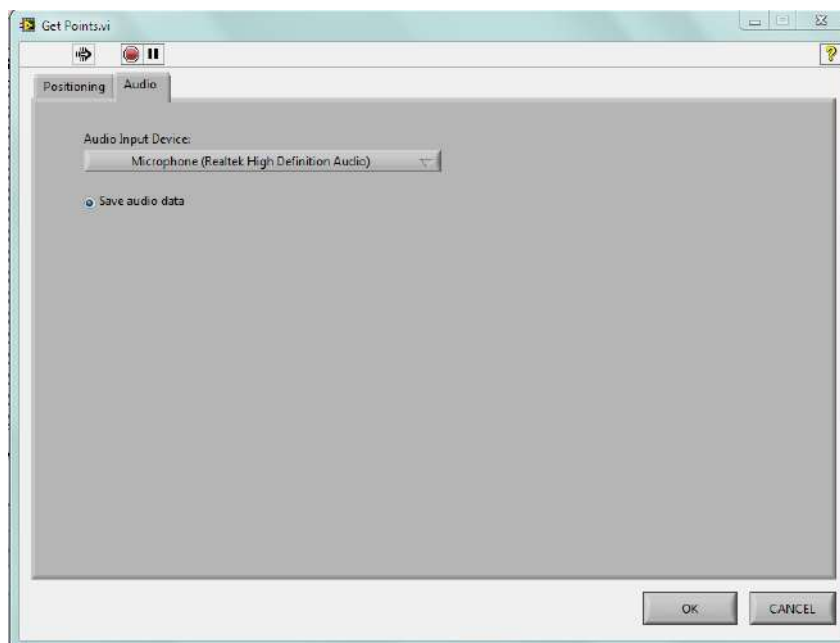


Figura 3.12 – Aba *Audio* do menu *Options* do programa de controle da mesa xy.

Para iniciar o ensaio a partir do ponto selecionado, basta clicar no botão *Play*. Se o botão *Auto* estiver ativo, o ensaio será inteiramente realizado de forma autônoma. Caso contrário, o usuário deverá incrementar ou decrementar a posição usando os botões *Previous* e *Next*. Se algum erro ocorrer, o processo poderá ser interrompido pressionando o botão *Pause*.

O Arduino então é responsável por enviar os pulsos para os drivers de forma que os dois motores operem paralelamente e de forma suave, para que não percam passos. O código do Arduino de controle dos motores se encontra no Apêndice B.

No final de cada ponto testado, a cor correspondente à frequência do sinal de áudio emitido pelo veículo é exibida no mapa. O botão *Clear* serve para deletar os resultados obtidos do ponto selecionado. A frequência exata que foi medida, é exibida na caixa de informações. Ao final do ensaio, um sinal sonoro é emitido pelo programa.

3.4.2- PROTOCOLO DE COMUNICAÇÃO SERIAL

O software e o Arduino realizam comunicação serial através da porta USB. A unidade mínima de dados que pode ser enviada é um *byte* (caractere). As mensagens podem ser formadas por vários caracteres. Para identificar as mensagens na sequência de caracteres recebidos no *buffer* da porta serial, a mensagem deve ser formatada segundo um protocolo de comunicação conhecido por ambos os dispositivos. O protocolo convencionado neste trabalho está ilustrado na Figura. O campo de dados tem comprimento arbitrário. O início de uma mensagem é indicado pela presença do caractere \$, e o final da mensagem, pelo caractere # (TANENBAUM e WETHERALL, 2011).

\$	go	Abscissa (4 carac.)	Ordenada (4 carac.)	#
----	----	------------------------	------------------------	---

Figura 3.13 – protocolo de comunicação serial convencionado neste trabalho.

A presença da *string* “go” na mensagem a identifica como um comando de posicionamento, e portanto os próximos 8 caracteres devem ser as coordenadas do ponto desejado.

3.4.3- ALGORITMO DO PROCESSAMENTO DE ÁUDIO

A seção de processamento de áudio do software é responsável por adquirir o sinal emitido pelo veículo, determinar se ele é contínuo ou intermitente, e calcular a frequência

dos beeps no caso do sinal ser intermitente. O fluxograma desse algoritmo pode ser visto na Figura 3.14.

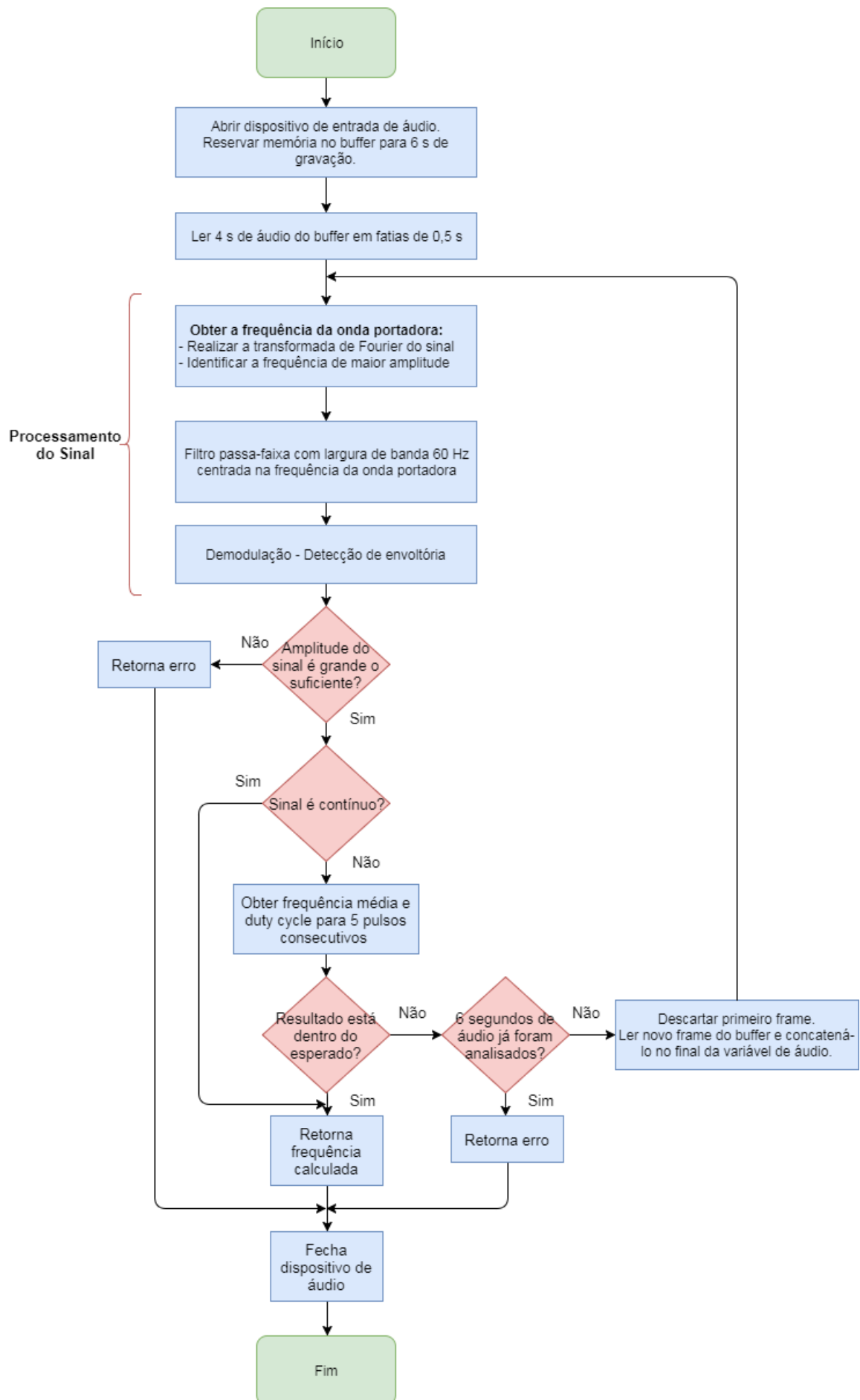


Figura 3.14 – Fluxograma do algoritmo de processamento de áudio.

O sinal de áudio intermitente pode ser entendido como um sinal modulado em amplitude DSB, em que o sinal modulante é um trem de pulsos retangulares (Figura).

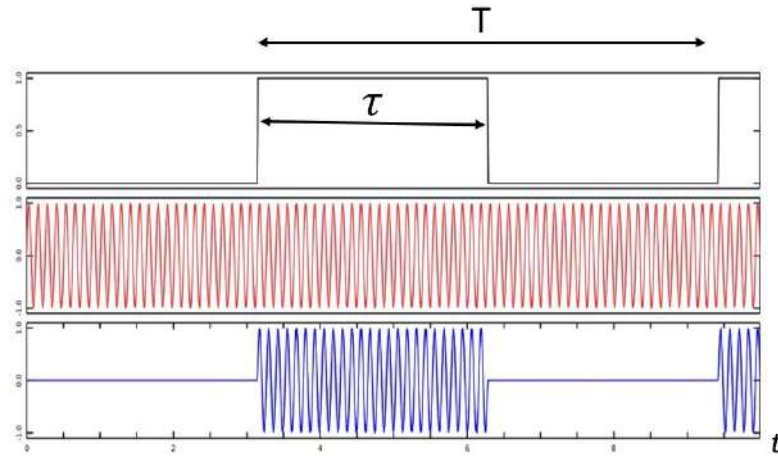


Figura 3.15 – Trem de pulsos retangulares (acima), portadora (no meio), e sinal de áudio (em baixo).

A onda quadrada tem a mesma frequência que o aviso sonoro, $1/T$. O método usado para extrair essa informação do sinal de áudio consiste primeiramente em fazer sua demodulação para extrair dele a onda retangular. Em seguida, usa-se um algoritmo que detecta as bordas de subida dos pulsos e calcula sua frequência.

Para que não haja sobreposição espectral no processo de demodulação, é necessário que o sinal de entrada tenha banda limitada. Por isso, a primeira etapa do algoritmo consiste em eliminar o ruído do sinal adquirido usando um filtro passa-faixa. A Figura mostra o espectro do sinal modulado, que é o espectro da onda quadrada deslocado pela frequência da portadora, f_0 .

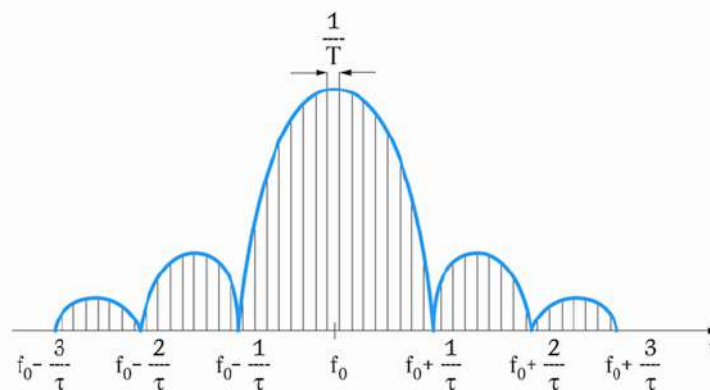


Figura 3.16 – Espectro do trem de pulsos retangulares deslocado por f_0 devido à modulação.

τ é o tempo de duração dos pulsos. A largura de banda do filtro deve ser tal que permita apenas a passagem do lóbulo principal do espectro do sinal de interesse. Essa medida diminui a distorção causada pelo ruído na onda quadrada obtida na demodulação, com o custo de deixar os pulsos um pouco arredondados. Entretanto esse efeito não tende a prejudicar a eficácia do *software*, visto que o componente espectral necessário à correta identificação da taxa de pulsos está muito próximo ao centro do lóbulo, e não será atenuado pelo filtro. A largura do lóbulo principal é $\frac{2}{\tau}$, em que τ é a largura do pulso. Considerando, a partir de testes realizados, que a largura dos pulsos não devem ser menores que $\tau = 0,03$ s, a largura máxima possível do lóbulo principal é de $\frac{2}{\tau} = \frac{2}{0,03} = 67$ Hz. As frequências de corte do filtro devem estar centradas em f_0 , que não é conhecido de antemão. Seu valor pode variar bastante dependendo do carro. Nos testes realizados, enquanto um carro apresentava um tom mais agudo, de 2000 Hz, outro apresentava um tom mais grave, de 700 Hz. Essa frequência foi então obtida pelo software como a frequência do componente de maior amplitude do espectro. Entretanto, para essa suposição ser válida, o nível de ruído do sinal antes da filtragem deve ser baixo.

Para garantir que a frequência do sinal intermitente obtida pelo algoritmo seja confiável, uma série de restrições foram colocadas. Primeiramente, para ser considerado adequado para a análise, o sinal, cujo módulo varia de 0 a 1, deve ter amplitude maior que 0,2 devido à influência de ruído. Outra restrição é que o algoritmo deve encontrar 5 beeps consecutivos de duração e frequência com pequena variância. O resultado é a média dessas 5 frequências. Seu valor deve estar entre 0 e 6 Hz. O sinal é considerado constante quando sua amplitude de pico a pico, após a filtragem, é inferior a 20% do seu valor máximo.

Se o sinal não satisfizer esses critérios na primeira tentativa, o programa analisa o sinal por mais tempo procurando pelos 5 pulsos consecutivos com as características desejadas. Se não forem encontrados um resultado ou sinal satisfatórios em até 6 segundos, o algoritmo retorna o valor -1 e a mensagem de erro mostrada na Figura 3.17.

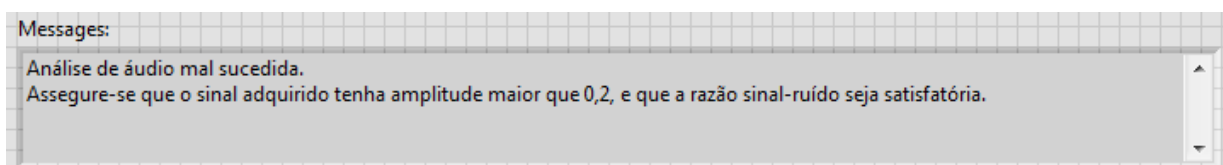


Figura 3.17 – Mensagem de erro gerada pelo algoritmo de processamento de áudio.

3.5-RECURSOS FÍSICOS E CUSTOS

A Tabela 3.2 lista os materiais e serviços usados na confecção deste projeto.

Tabela 3.2 - Recursos necessários.

Descrição	Qtde	Unid. (R\$)	Custo (R\$)
Motores de passo Saehan 2S39Q NEMA 17 1,1 kgf-cm 2,0 V	2	35,00	70,00
<i>Pillow block</i> ¹ SCS8UU com rolamento de ϕ 8 mm	4	20,00	80,00
<i>Pillow block</i> aberto SBR 12UU com rolamento de ϕ 12 mm	4	25,00	100,00
Barra redonda retificada de aço SAE 1045 H7 ϕ 12 mm x 1 m	2	30,00	60,00
Barra redonda retificada de aço SAE 1045 H7 ϕ 8 mm x 1 m	2	25,00	50,00
Suporte SK8 para a guia de ϕ 8 mm em alumínio	4	17,00	68,00
Suporte SK12 para a guia de ϕ 12 mm em alumínio	4	17,50	70,00
Suporte em L para motor de passo NEMA 17	2	17,50	35,00
Polia sincronizadora GT2 20 dentes em alumínio	2	15,00	30,00
Correia sincronizadora GT2 passo 2 mm largura 6 mm 3 m	1	30,00	30,00
Polia esticadora GT2 20 dentes com rolamento em alumínio	2	15,00	30,00
Drivers de motores de passo Pololu A4988	2	17,00	34,00
Cantoneira de alumínio 5x5 cm 3 m	1	50,00	50,00
Anteparo (tubo PVC ϕ 7,5 cm x 1 m)	1	10,00	10,00
Usinagem das peças fabricadas	1	300,00	300,00
		Total:	1017,00

¹Tradução: unidade de rolamento linear de esferas.

4- RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a montagem da parte mecânica, algumas medidas foram tiradas a fim de conferir se as dimensões e o alinhamento estavam dentro de limites satisfatórios para garantir a exatidão do posicionamento do anteparo. O alinhamento das guias é particularmente importante porque, como o conjunto guia-rolamento possui pequena tolerância no ajuste, um pequeno desalinhamento poderia causar a limitação do movimento do carro de translação. A Figura 4.1 apresenta um diagrama representativo da mesa xy vista por cima e algumas medidas importantes. As medidas mostram que as guias estão paralelas. Foi necessário conferir também se o anteparo estava na vertical, e se a mesa estava nivelada.

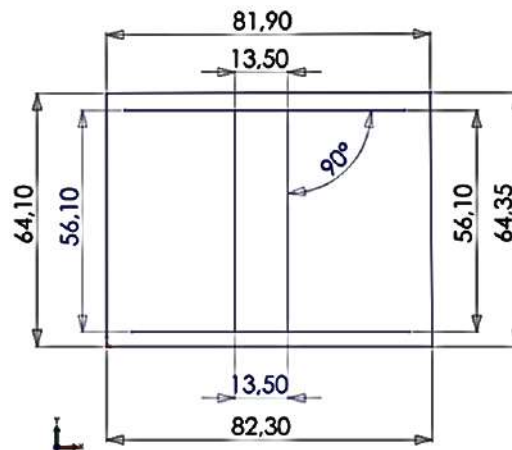


Figura 4.1 - Medidas, em cm, para conferir alinhamento da mesa xy.

O segundo teste consistiu em enviar comandos de posicionamento para a mesa xy através do software desenvolvido e conferir se o erro de posicionamento é menor que o máximo admissível, 0,5 cm. Os resultados podem ser observados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Validação do sistema de posicionamento da mesa xy.

Posição desejada (mm)	Posição medida (mm)
(160, -209)	(161,0; -209,0) ± 0,5
(320, -209)	(320,5; -209,0) ± 0,5
(160, 209)	(160,5; 209,0) ± 0,5
(320, 209)	(320,5; 209,0) ± 0,5
(442, 120)	(442,0; 121,0) ± 0,5
(442, -120)	(442,0; -119,5) ± 0,5

O erro de posicionamento máximo entre a posição medida e a desejada é 1,5 mm, e portanto, o sistema apresentou exatidão satisfatória. A velocidade de movimentação do anteparo também está dentro do previsto, 15 cm/s, para que o motor não perca sincronismo.

4.1-VALIDAÇÃO DO SISTEMA DE ÁUDIO

O algoritmo de processamento de áudio foi testado separadamente. O código usado para fazer o teste pode ser visto na Figura 4.2.

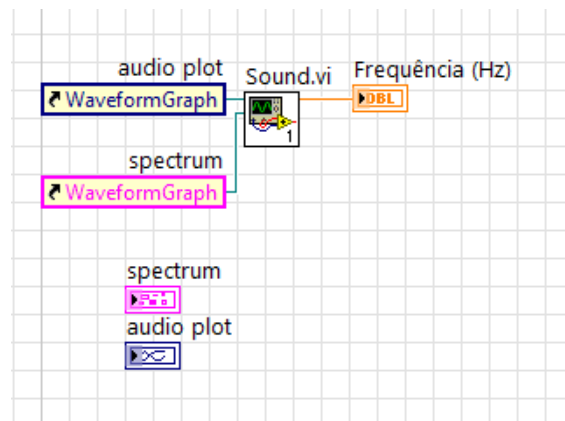


Figura 4.2 – Código LabVIEW do teste do sistema de áudio.

O alerta sonoro de dois carros diferentes foi gravado com o auxílio de um celular e depois reproduzido perto do computador em que o programa estava sendo executado. O resultado do teste pode ser visto na Figura 4.3.

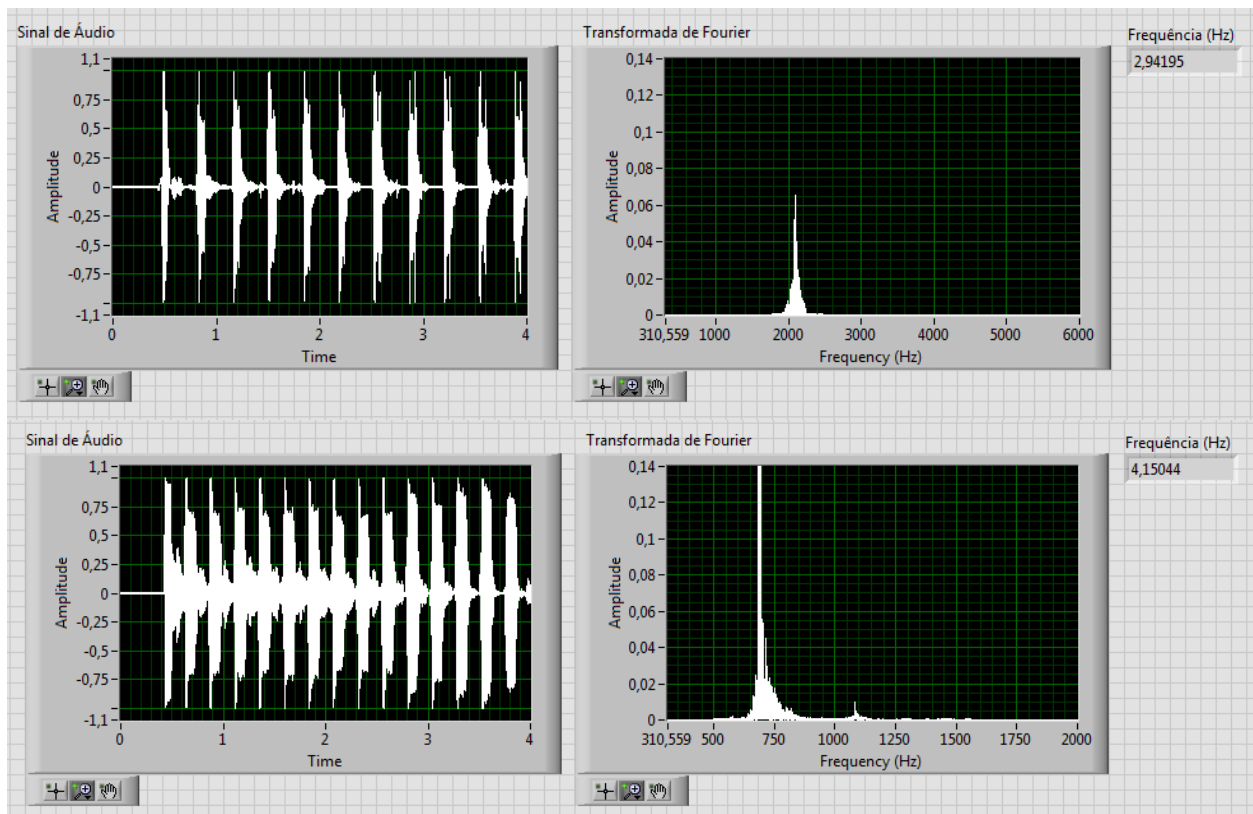


Figura 4.3 – Resultado do teste do sistema de áudio

O teste foi bem sucedido. O algoritmo foi capaz de medir a frequência de alertas sonoros de tons diferentes corretamente, como pode ser conferido visualmente nos gráficos. Entretanto, a fonte sonora teve que ser colocada a uma distância de no mínimo 10 cm do microfone para que a razão sinal-ruído não fosse desfavorável.

4.2-VALIDAÇÃO DO SISTEMA DE COMPLETO

O sistema automatizado foi testado como um todo em uma situação real (Figura 4.4). A base da mesa xy teve que ser alinhada com a traseira do veículo. Para isso, usou-se um conjunto de tábuas de madeira apoiadas nas rodas.

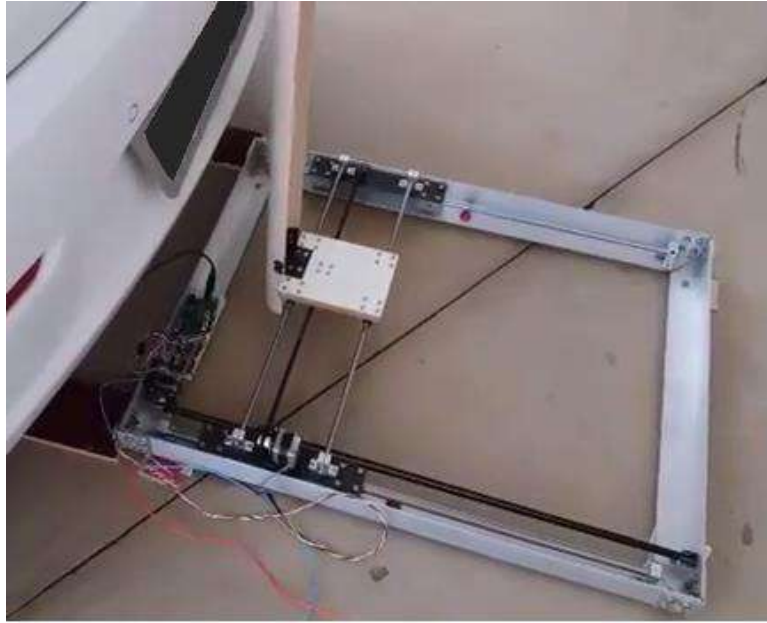


Figura 4.4 – Foto da mesa xy posicionada atrás de um veículo para execução do teste do sistema completo.

Tanto o software, quanto o sistema mecânico operaram dentro do previsto.

5- CONCLUSÃO

A mesa de coordenadas cartesianas desenvolvida foi capaz de realizar o ensaio de forma autônoma, ou seja, sem a necessidade de supervisão. O ensaio feito manualmente leva até 4 horas para ser concluído, já com o uso da mesa xy, o teste poderia ser realizado em apenas 40 min.

O algoritmo de análise do som foi bem sucedido em medir a frequência do alerta sonoro para sons emitidos por veículos diferentes, e também em dar uma resposta confiável mesmo na presença de ruído.

O protótipo teve boa resposta na validação do posicionamento, mantendo exatidão mesmo com uso prolongado. Entretanto é necessário realizar testes com maior número de medições para determinar a repetibilidade e confiabilidade do equipamento.

A utilização de motores de passo em conjunto com as correias sincronizadoras possibilitou o desenvolvimento de um dispositivo de posicionamento de baixo custo, precisão e simplicidade de controle.

6- PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se a complementação da mesa xy com o monitoramento da corrente dos motores. Isso possibilita que o equipamento perceba alguma sobrecarga e possível perda de sincronismo dos motores de passo.

Chaves de fins de curso também podem ser usadas para permitir que a própria mesa xy recalibre seu sistema de posicionamento de forma fácil e frequente, aumentando a confiabilidade do equipamento.

Uma alternativa à mesa xy é o uso de robôs móveis guiados por visão computacional e marcações no solo. Essa abordagem propicia um sistema mais compacto. Como os pontos de localização não podem ser fixos no solo, as marcações poderiam ser feitas em um tabuleiro dobrável.

7- REFERÊNCIAS

- Allegro MycroSystems. **A4988 - DMOS Microstepping Driver with Translator And Overcurrent Protection**. 4988-DS, Rev. 5. 2014.
- BEER, F. P. e JOHNSTON, E. R. JR. **Resistência dos Materiais**. 3. ed. São Paulo: Pearson Makron Books, 1995.
- BOLTON, William. **Mecatrônica: uma abordagem multidisciplinar**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2010.
- BUDYNAS, R. G; NISBETT J. K. **Elementos de Máquinas de Shigley**. 8. ed. Porto Alegre: AMGH, 2011.
- LATHI, B. P. **Sinais e sistemas lineares**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2007.
- MACHADO, Hugo Araújo. **Impressora para grafia direta em placas de circuito impresso utilizando comandos numéricos computadorizados**. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Divinópolis. 2015.
- National Instruments Corporation. **LabVIEW™ Intermediate I - Successful Development Practices Course Manual**. Course Software Version 8.0. Edição de Outubro de 2005. Part Number 323756B-01. Austin. 2005.
- NETO, A. C. **Pesquisa fornece argumentos para vender acessórios**. Revista Automotivo, Santana - SP, n. 113, p. 76-77, 2017.
- Notas de aula da disciplina Projeto de Máquinas, ministrada pelo prof. Me. Juliano de Barros Veloso e Lima. CEFET-MG. Divinópolis. 2017.
- OLIVEIRA, Lucas Silva. **Automação da Técnica de Braquiterapia de Alta Dose por Agulhamento Utilizando uma Mesa XY Orientada por Imagem Radiográfica**. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Divinópolis. 2013
- OLIVEIRA, Otávio J. (org.). **Gestão de qualidade: tópicos avançados**. São Paulo: Cengage Learning, 2004.
- POLOLU Robotics and Electronics. **A4988 stepper driver carrier**. Disponível em <<https://www.pololu.com> > Acesso em: 17/08/2017.
- SOUZA, Walter Campos. **Desenvolvimento de um Sistema de Movimentação Tipo Pórtico Para Aplicações em Projetos de Robótica**. 2014.

TANAKA, Carlos Naomi. **Metodologia de dimensionamento do sistema de tração para veículos elétricos**. Dissertação de Mestrado em Ciências. São Paulo, 2013.

TANENBAUM, Andrew S. WETHERALL, David J. **Computer Networks**. 5. ed. Boston: Prentice Hall, 2011.

The Gates Rubber Company. **PowerGrip®GT®2 Belt Drive Design Manual**. n. 17195. 2000.

TRETTETTER, Steven A. **Communication system design using DSP algorithms**. Nova Iorque: Springer, 2008.

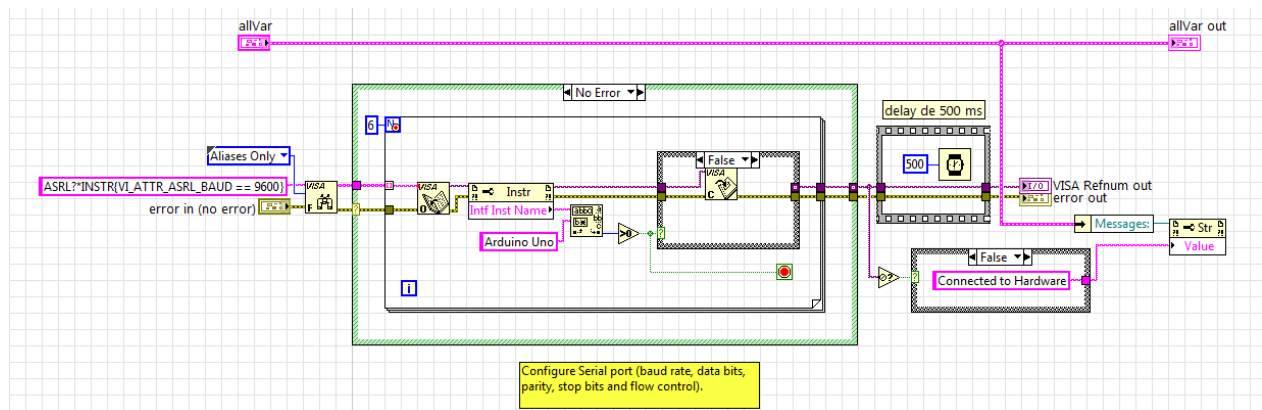
8- APÊNDICE

Esta seção tem por função apresentar material complementar elaborado pelo autor.

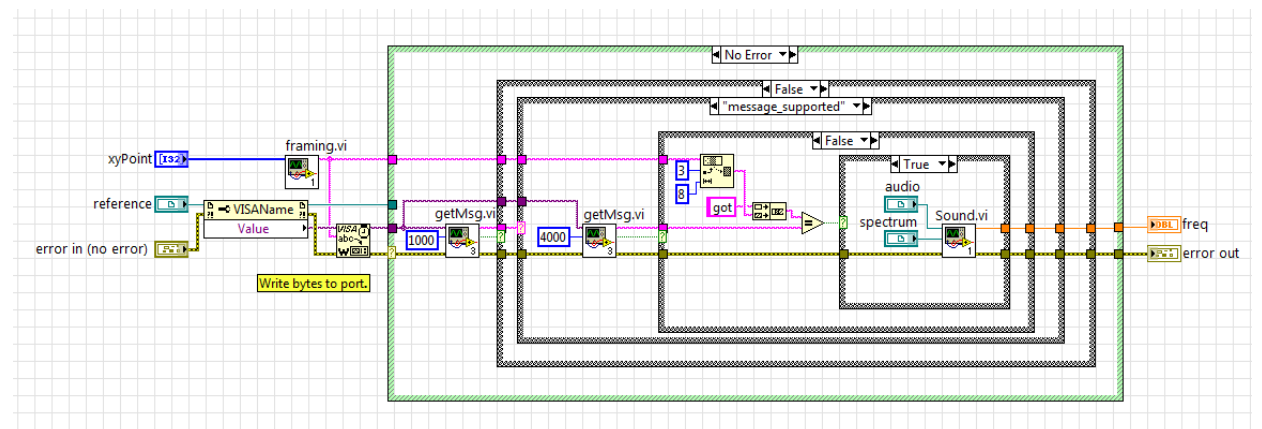
8.1-APÊNDICE A – CÓDIGO DO SOFTWARE NO LABVIEW

A seguir são apresentadas algumas funções definidas pelo usuário usadas no software de controle da mesa xy no LabVIEW.

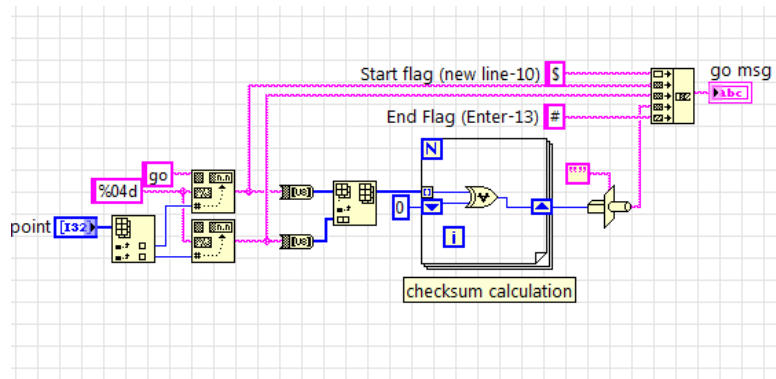
Função Start Serial - Responsável pela conexão do software com a porta serial em que o Arduino está conectado. É executada uma vez no início do programa e sempre quando o usuário clica no botão Play e ocorre um erro de conexão.



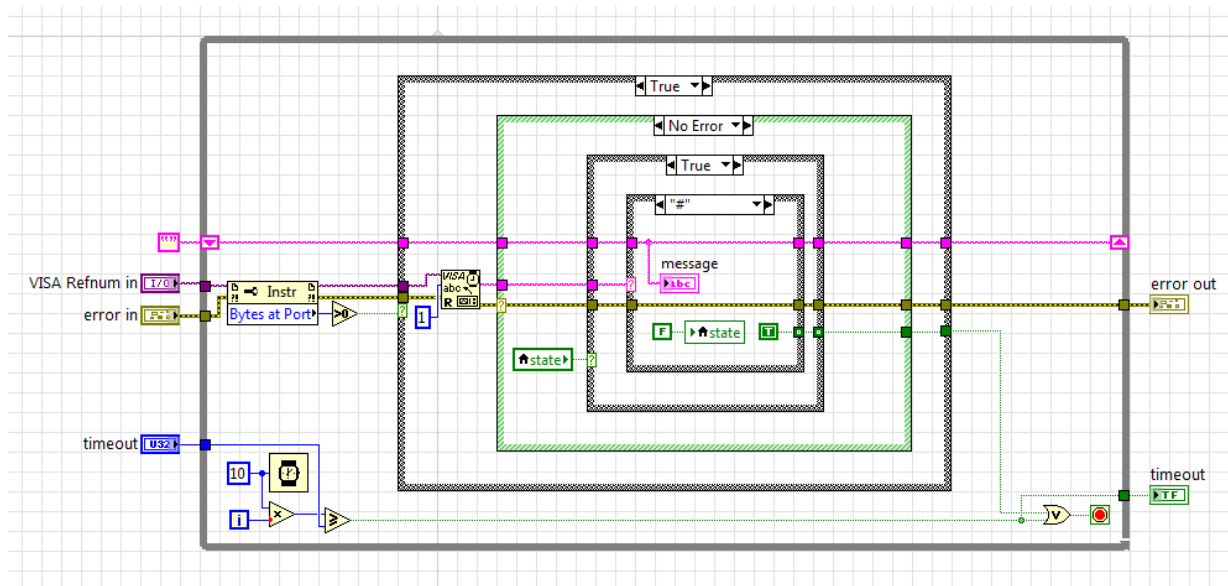
Função Play Test - Responsável pela realização do teste de um ponto enviado como parâmetro. Envia os comandos de movimentação e calcula a frequência do sinal de áudio.



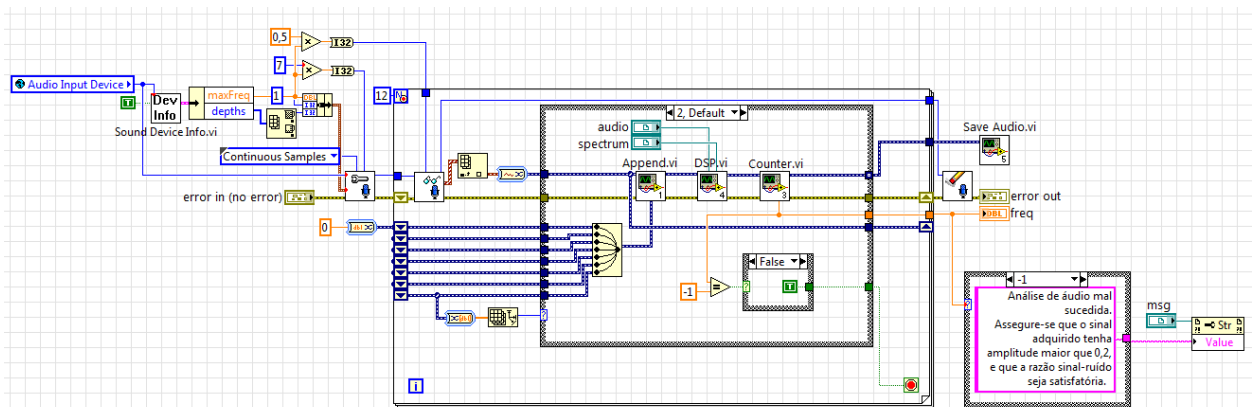
Função Framing - Formata os comandos a serem enviados para a mesa xy de acordo com o protocolo de comunicação serial convencional neste trabalho.



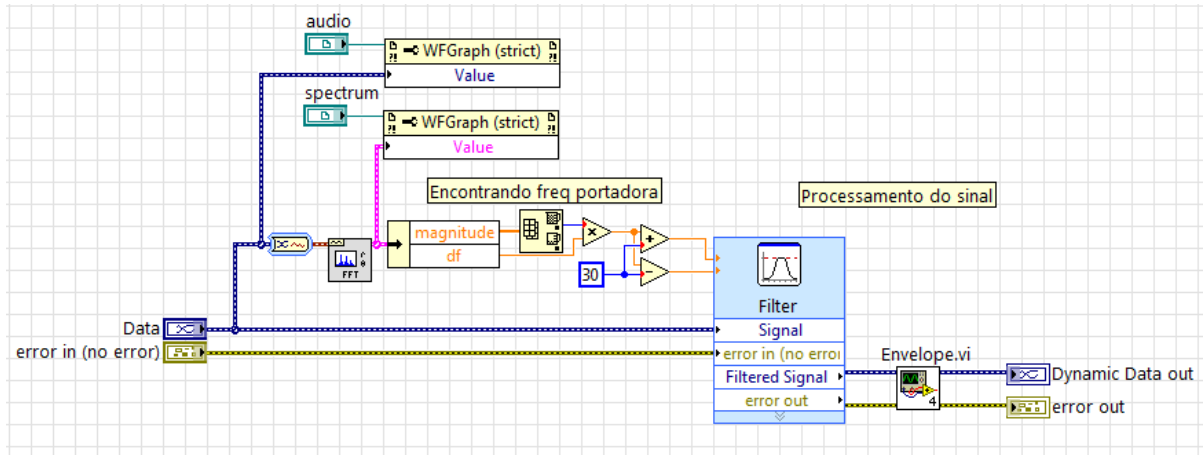
Função GetMsg – Procura no buffer da porta serial por mensagens compatíveis com o protocolo de comunicação.



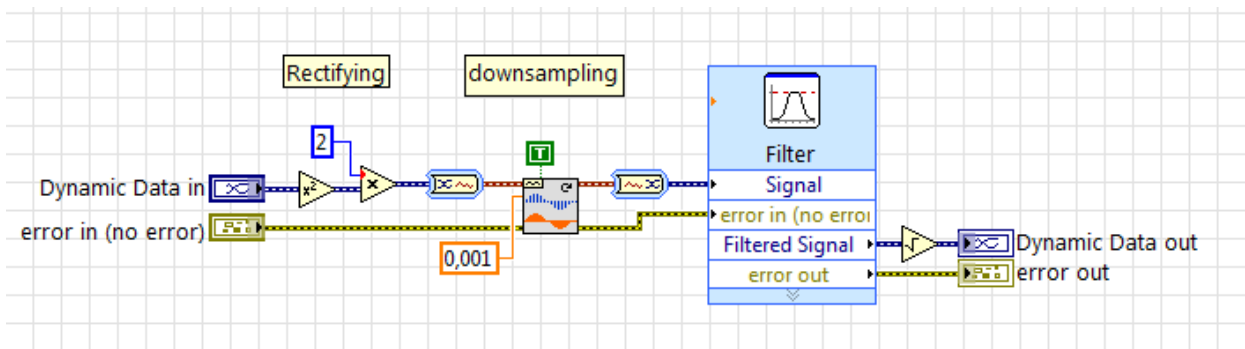
Função Sound – Responsável pela aquisição de som e pelo calculo da frequência do aviso sonoro.



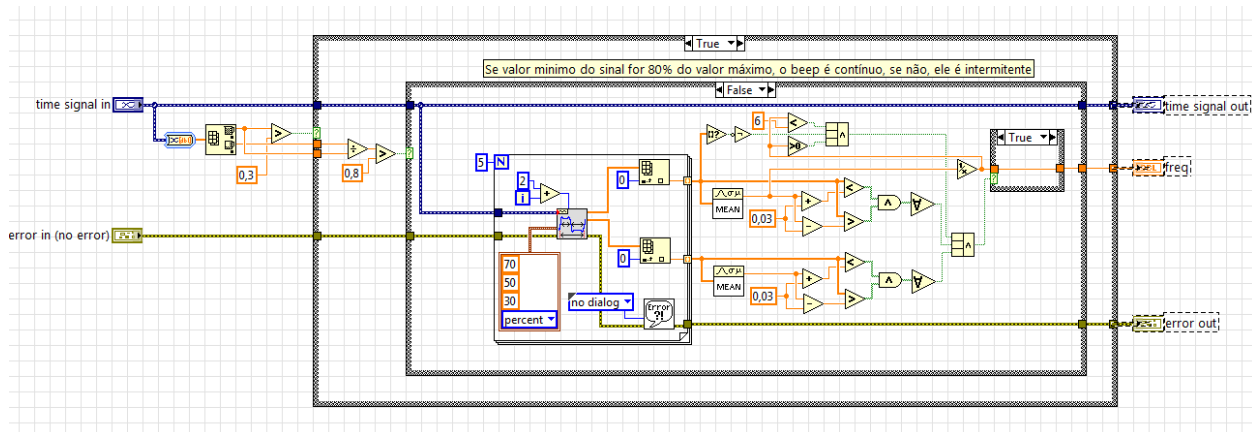
Função DSP – Sigla para *Digital Signal Processing*. Filtra e realiza a demodulação do sinal de áudio.



Função Envelope – Realiza a demodulação do sinal, ou extração da envoltória.



Função Counter – Identifica a classe do sinal (Contínuo/Intermitente), e calcula a frequência do sinal intermitente a partir do trem de pulsos retangulares.



8.2-APÊNDICE B – CÓDIGO DO SOFTWARE NO ARDUINO

```
#include <EEPROM.h>

//Define os pinos para os motores:
const byte M1passo = 2;
const byte M1dir = 3;
const byte M2passo = 4;
const byte M2dir = 5;

double passolin = 0.01;//meio passo linear[cm]
int ppsMax = 700;// PPS máximo [Hz]

//Constantes:
const double acel = 40; // módulo máximo admissível da aceleração vetorial do carro de
translação Y
const double Vmax = 15;//cm/s

//table boundaries [cm]:
const int xMax = 42;
const int xMin = 0;
const int yMax = 20;
const int yMin = -20;

double pos[2] = {0, 0}; // vetor posicao atual do carro Y. indice 0 = ordenada (x). indice 1
= abcissa (y)
double pos0[2] = {0, -20.9};
double posf[2] = {10, 0}; // vetor posicao final desejada do carro Y
double dvec[2] = {0, 0}; //vetor deslocamento
double versor[2] = {0, 0};
double ds[2] = {0}; // delta-s (espaço a percorrer)
double dpx = 0;
double dpy = 0;

// SERIAL COMMUNICATION:
char inChar = 0;
const char StartFlag = '$'; //10;
const char EndFlag = '#'; //13;
const char ESC = 16; //Data link escape (DLE)
byte state = 0; //0-Looking for start of message. 1-Store data. 2-Treatment for the
special characters in the data.
String message;
bool serialError = 0;

double t = 0; //tempo transcorrido desde o início do movimento [s]
double d = 0; //distancia percorrida a partir do ponto inicial até a posição atual
long unsigned int t0 = 0;
bool found=0;

void setup() {
  Serial.begin(9600);// inicializa comunicação serial com baud rate de 9600 bps
  while (!Serial) {} // wait for serial port to connect. Needed for native USB port only
```

```

//Definindo pinos como entrada ou saída:
pinMode(M1passo, OUTPUT);
pinMode(M1dir, OUTPUT);
pinMode(M2passo, OUTPUT);
pinMode(M2dir, OUTPUT);

//EEPROM.read(0);
//EEPROM.write(0, 23);
}

void loop() {
  if (Serial.available() > 0) {
    inChar = Serial.read();
    delay(50);

    if (state == 0) {
      if (inChar == StartFlag)
        state = 1;
    }
    else if (state == 1) {
      if (inChar != EndFlag) {
        message += inChar; //extract the message from the byte stream in serial port
        buffer
      }
      else {
        if (!isChecksumOK(message)) {
          if (message[0] == 'g' && message[1] == 'o') { //command to move to certain
            position
            if (message.length() == 11 && isNum(message) && withinLimits(message)) {
            }
            else
              serialError = 1;
          }
          else if (message[0] == 'i' && message[0] == 'd') { //command to identify the
            software
          }
          else {
            serialError = 1;
          }
        }
        else {
          serialError = 1;
        }
      }
    }

    if (serialError)
      Serial.print(String(StartFlag) + "message_not_supported" + EndFlag);
    else {
      Serial.print(String(StartFlag) + "message_supported" + EndFlag);
      posf[0] = message.substring(2, 6).toInt();
      posf[1] = message.substring(6, 10).toInt();
      move2pos();
    }
  }
}

```

```

    }

    serialError = 0;//reset error flag
    state = 0;
    message = String("");//clear buffer
}
}
}
}

void move2pos()
{
    dvec[0] = posf[0] - pos0[0];//cm
    dvec[1] = posf[1] - pos0[1];
    //distancia total a ser percorrida até atingir a posição final desejada:
    double dist = sqrt(pow(dvec[0], 2) + pow(dvec[1], 2));
    versor[0] = dvec[0] / dist;//orientacao do vetor deslocamento
    versor[1] = dvec[1] / dist;

    setDir(M1dir, dvec[0]);
    setDir(M2dir, dvec[1]);

    //Calculo dos coeficientes das equações horarias da trajetoria:
    double a1 = acel / 2;
    double a2 = Vmax;
    double b2 = -pow(Vmax, 2) / (2 * acel);
    double a3 = -a1;
    double b3 = acel * dist / Vmax + Vmax;
    double c3 = -(pow(acel * dist, 2) + pow(Vmax, 4)) / (2 * acel * pow(Vmax, 2));
    double a4 = a3;
    double b4 = 2 * sqrt(acel * dist);
    double c4 = -dist;
    double t1 = Vmax / acel; // instante final da primeira parte da trajetoria (aceleracao) e
    inicio da segunda parte da trajetória
    double t2 = dist / Vmax; //(dist + Vmax) / 2 / acel; // instante em que a desaceleração
    começa (grafico VxT trapezoidal).
    double tDesac = sqrt(dist / acel) ; // instante em que a desaceleração começa (grafico
    VxT triangular).

    t0 = millis();
    while (abs(posf[0] - pos[0]) > 1e-2 || abs(posf[1] - pos[1]) > 1e-2) { //enquanto posição
    atual for diferente da posição desejada
        t = (millis() - t0) / 1000.0; //tempo transcorrido desde o início do movimento [s]

        if (tDesac < t1) { //se verdadeiro, o gráfico de velocidade por tempo do movimento é
        triangular
            if (t < tDesac)
                d = a1 * pow(t, 2);
            else
                d = a4 * pow(t, 2) + b4 * t + c4;
        }
        else { //caso contrário, o gráfico de velocidade por tempo do movimento é trapezoidal

```

```

    if (t < t1)
        d = a1 * pow(t, 2);
    else if (t < t2)
        d = a2 * t + b2;
    else
        d = a3 * pow(t, 2) + b3 * t + c3;
}

// calculating delta-s-x and delta-s-y:
ds[0] = d * versor[0] - (pos[0] - pos0[0]);
ds[1] = d * versor[1] - (pos[1] - pos0[1]);

// quantos passos discretos do motor chegam mais próximo da posição desejada:
dpx = round(ds[0] / passolin); // delta passo 1
dpy = round(ds[1] / passolin);

if (dpx != 0) { // Se houver passos a serem rodados...
    girarPassos(M1passo, abs(dpx)); // enviar comando aos drivers dos motores:
    pos[0] = pos[0] + (dpx * passolin); //atualizar posicao atual
}
if (dpy != 0) {
    girarPassos(M2passo, abs(dpy));
    pos[1] = pos[1] + (dpy * passolin); //atualizar posicao atual
}
//Serial.println(pos[0]);
}
//atualizar posicao atual:
pos0[0] = pos[0];
pos0[1] = pos[1];
Serial.println(String(StartFlag) + "got" + message.substring(2, 10) + EndFlag);
}

void setDir(const byte dirPin, const double desloc) { // informar sentido de rotacao do
motor:
    if (desloc > 0)
        digitalWrite(dirPin, HIGH);
    else
        digitalWrite(dirPin, LOW);
    delayMicroseconds(10); // o sentido de rotação deve ser alterado 200 ns antes de
enviar o pulso a STEP. Currently, the largest value that will produce an accurate delay
is 16383!!
}

void girarPassos(const byte stepPin, const byte qtdePassos) {
    for (byte index = 0; index < qtdePassos; index++) {
        digitalWrite(stepPin, HIGH); //gerar um pulso no pino STEP do driver do motor de
passo:
        delayMicroseconds(200); //largura mínima do pulso em nível alto na entrada STEP
do A4988 é 1 microssegundo.
        digitalWrite(stepPin, LOW);
        delayMicroseconds(200);
    }
}

```

```

}

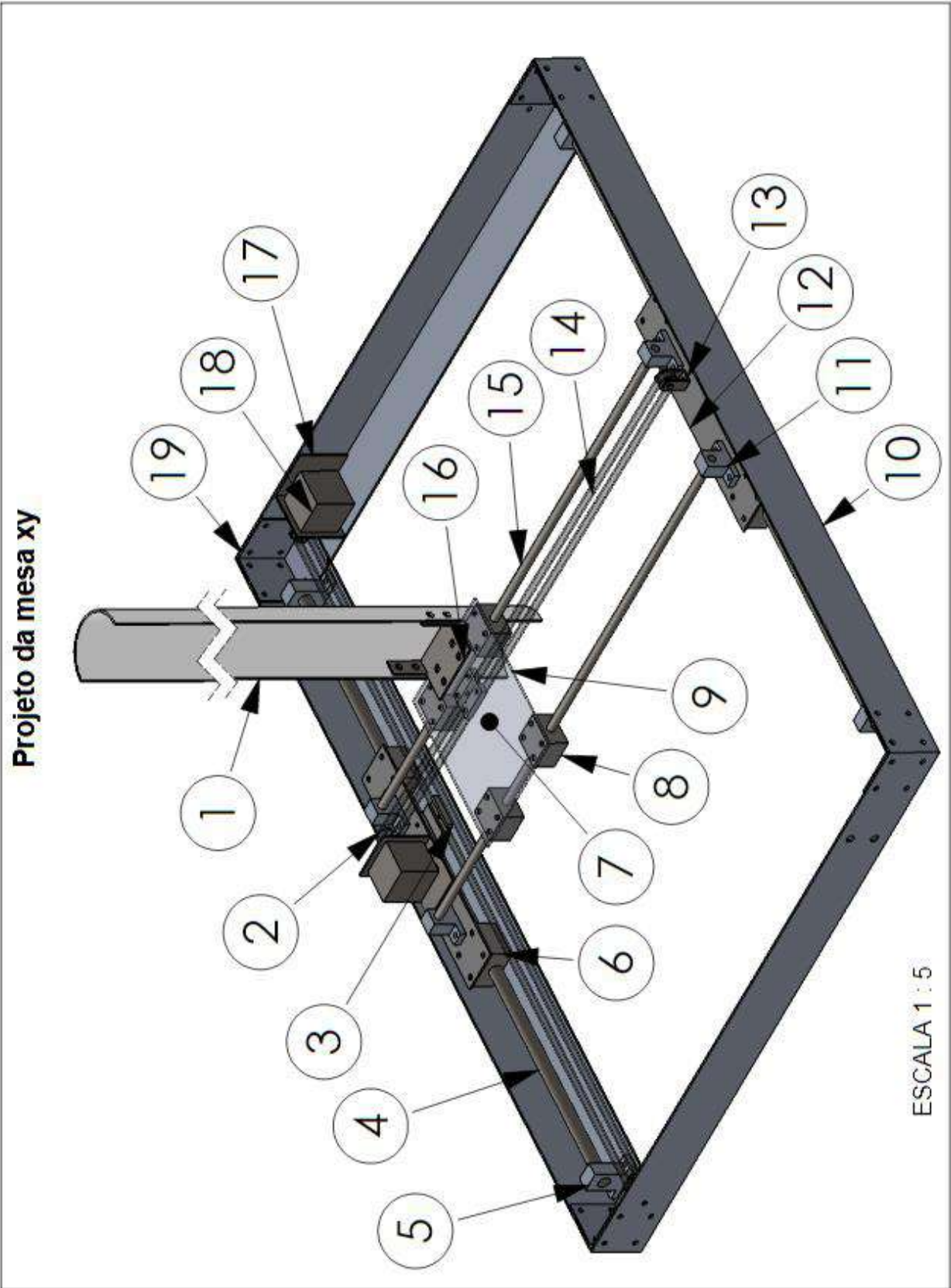
bool isNum(String message) {
    for (byte i = 3; i < 6; i = i + 1) {
        if (!isDigit(message[i]) || !isDigit(message[i + 4])) {
            return 0;
        }
    }
    return 1;
}

bool withinLimits(String message) {
    int aux1 = message.substring(2, 6).toInt();
    int aux2 = message.substring(6, 10).toInt();
    if (aux1 <= xMax && aux1 >= xMin && aux2 <= yMax && aux2 >= yMin)
        return 1;
    else
        return 0;
}

bool isChecksumOK(String message) {
    byte checksum = 0;
    for (int i = 0; i < message.length() - 2; i = i + 1) {
        checksum = checksum ^ (byte)message[i];
    }
    if (checksum == (byte)message[message.length() - 1])
        return 1;
    else
        return 0;
}

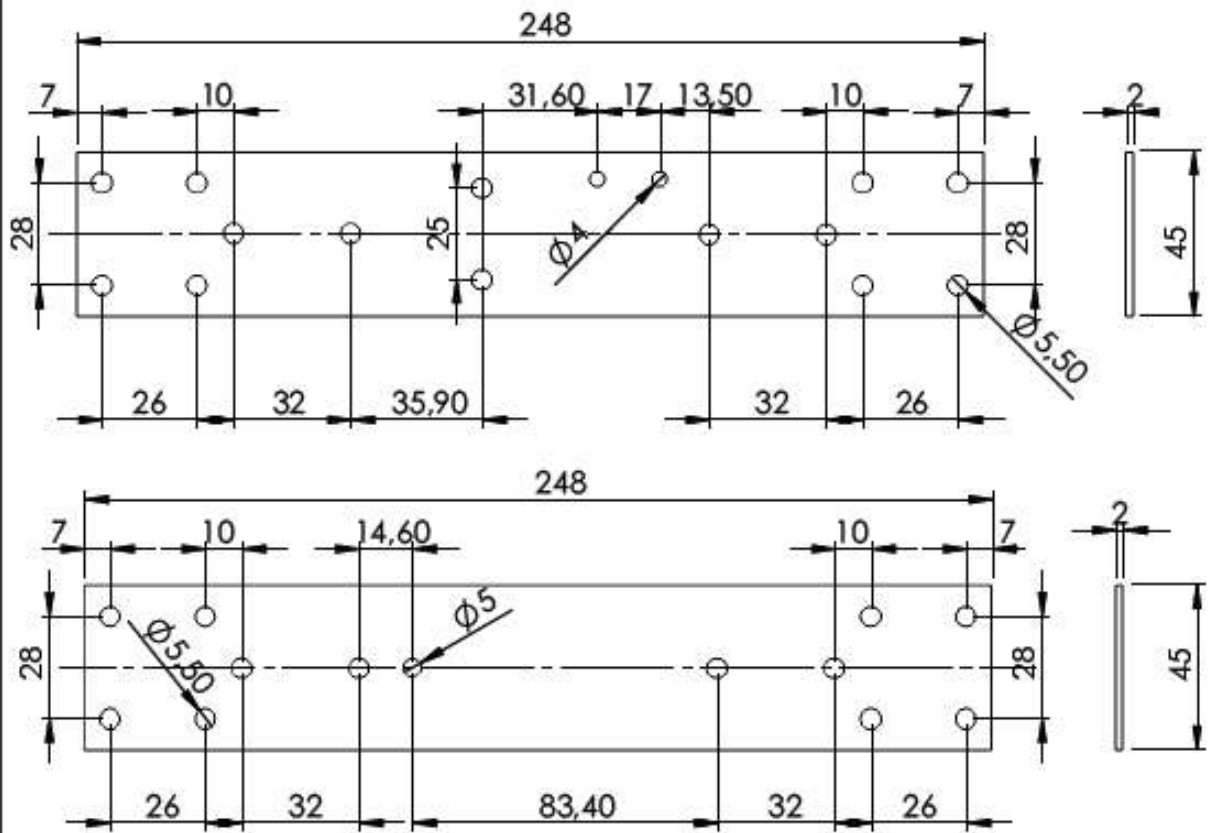
```

8.3-APÊNDICE C – MODELO DA PARTE MECÂNICA DA MESA XY NO SOLIDWORKS



Lista de peças		
Peça	Descrição	Qtd
01	Anteparo (tubo PVC ϕ 7,5 cm x 1 m)	1
02	Polia sincronizadora Gt2 20 dentes largura 6 mm em alumínio	2
03	Acoplador para a correia maior	1
04	Barra redonda retificada de aço SAE 1045 H7 ϕ 12 x 700 mm	2
05	Suporte SK12 para a guia de ϕ 12 mm em alumínio	4
06	<i>Pillow block</i> aberto SBR 12UU com rolamento de ϕ 12 mm	4
07	Acoplador para a correia menor	1
08	<i>Pillow block</i> ¹ SCS8UU com rolamento de ϕ 8 mm	4
09	Carro de translação ao longo do eixo Y	1
10	Cantoneira da base em alumínio 5x5 cm	4
11	Suporte SK8 para a guia de ϕ 8 mm em alumínio	4
12	Carro de translação	2
13	Polia esticadora Gt2 20 dentes largura 6 mm em alumínio	2
14	Correia sincronizadora Gt2 (menor: 1213 mm, maior: 1582 mm)	2
15	Barra redonda retificada de aço SAE 1045 H7 ϕ 8 x 600 mm	2
16	Peça de fixação do anteparo	1
17	Suporte em L para motor de passo NEMA 17	2
18	Motor de passo Saehan 2S39Q NEMA 17 1,1 kgf-cm	2
19	Cantoneira de união em alumínio 5x5 cm	4

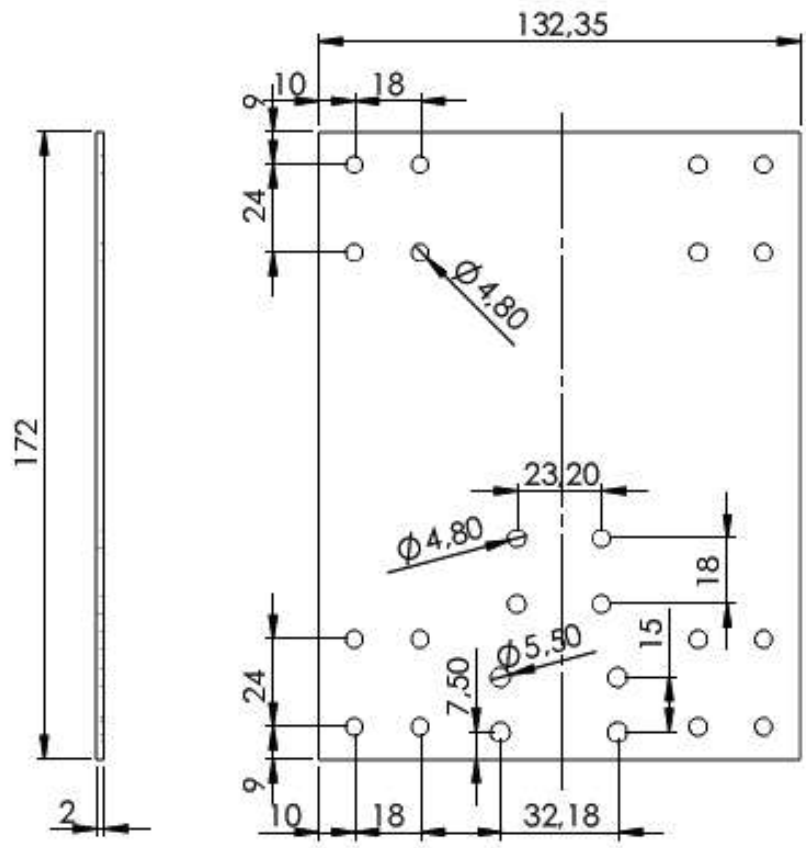
12



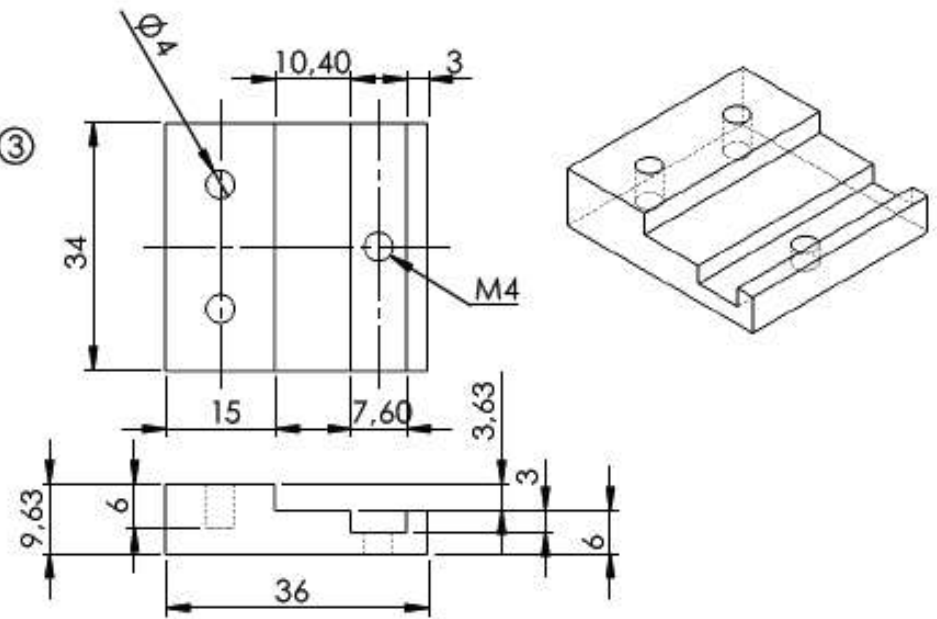
Peça	Descrição	Material	Escala
12	Carros de translação	Aço 1020	1:2

Autor: Denis Nogueira Viana

⑨



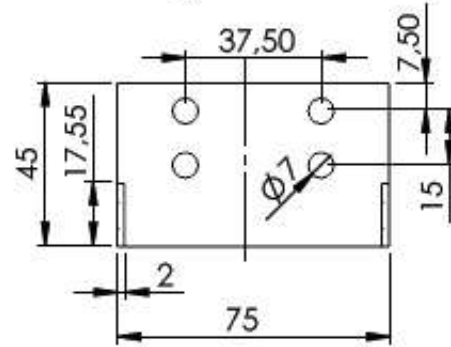
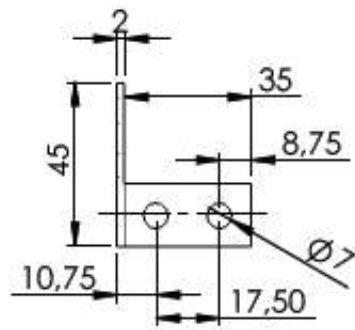
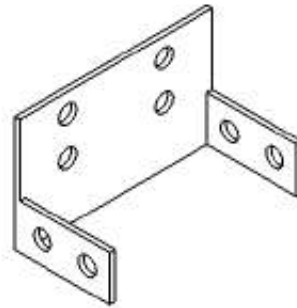
③



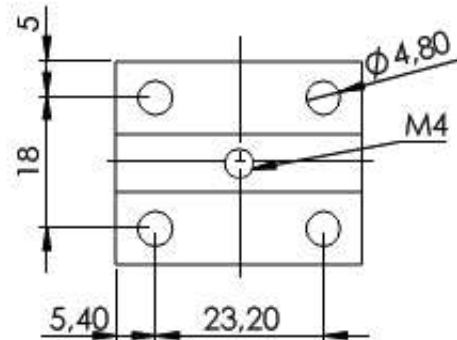
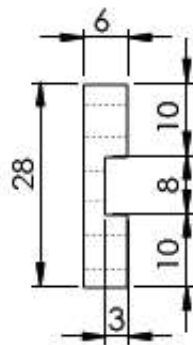
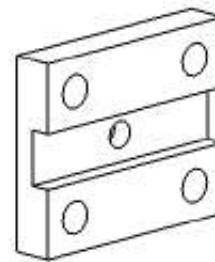
Peça	Descrição	Material	Escala
9	Plataforma	Aço 1020	1:2
3	Acoplador para a correia maior	Aço 1020	1:1

Autor: Denis Nogueira Viana

16



7



Peça	Descrição	Material	Escala
16	Peça de fixação do anteparo	Aço 1020	1:2
7	Acoplador para a correia menor	Aço 1020	1:1

Autor: Denis Nogueira Viana

8.4-APÊNDICE D – DIMENSIONAMENTO DAS GUIAS LINEARES

As guias lineares foram dimensionadas segundo os critérios de projeto de eixos e árvores retirados de Lima (2017). As guias foram consideradas eixos fixos. O diâmetro de um trecho do eixo é obtido pela fórmula

$$d \geq \sqrt[3]{\frac{16}{\pi\sigma_f} \sqrt{(K_f M_f)^2 + (K_t M_t)^2}}$$

em que

d é o diâmetro do trecho do eixo, em mm ;

σ_f é a tensão admissível final, em kgf/mm^2 ;

M_f é o momento fletor máximo que ocorre no trecho, em $kgf \cdot mm$;

M_t é o momento torçor máximo que ocorre no trecho, em $kgf \cdot mm$;

K_f é o coeficiente de flexão; e

K_t é o coeficiente de torção.

A tensão admissível final suportada pelo material do eixo deve ser o menor valor entre $0,18\sigma_u$ e $0,30\sigma_e$, ou seja,

$$\sigma_f = \text{mínimo}(0,18\sigma_u; 0,30\sigma_e)$$

em que

σ_u é o limite de resistência do material; e

σ_e é o limite de escoamento do material.

Foi considerado que as guias lineares não sofrerão torção, e portanto $M_t = 0$. Os momentos fletores, M_f , nas guias lineares foram determinados pelos diagramas de momento fletor das vigas simplesmente apoiadas nas extremidades em carregamento transversal. Cada guia sofrerá a ação do seu próprio peso, uniformemente distribuído e do peso do carro de translação Y , P , que é uma força concentrada aplicada no centro da guia linear. O momento fletor máximo, $M_{máx}$, que ocorre no centro da guia, é obtido pela fórmula (BEER e JOHNSTON, 1995)

$$M_{máx} = \frac{wL^2}{8} + \frac{PL}{4}$$

em que L é o comprimento da guia, e w é o peso da guia por unidade de comprimento. Em função do diâmetro, w é expresso por $w = \frac{\pi}{4} \rho g d^2$, em que ρ é a massa específica do material, e g é a aceleração da gravidade.

A seguir, são dados os valores para as variáveis. O material comumente usado para este propósito é o aço SAE 1045. As tensões mínimas do aço SAE 1045 laminado a quente (BUDYNAS e NISBETT, 2011) são $\sigma_u = 570 \text{ MPa}$ e $\sigma_e = 310 \text{ MPa}$.

$$\sigma_f = 93 \text{ MPa} (9,5 \text{ kgf/mm}^2).$$

Para eixos fixos sob ação de carga gradualmente aplicada (sem choque), $K_f = 1$ (LIMA, 2017).

$$\rho = 7800 \text{ kg/m}^3 \text{ (BUDYNAS e NISBETT, 2011)}$$

$$L = 0,670 \text{ m}$$

$$P = 15 \text{ N}$$

Primeiramente, para o dimensionamento das guias menores, que sustentam o carro Y, resolveu-se iterativamente para d , obtendo-se

$$d \geq 5,22 \text{ mm}$$

Resolvendo-se similarmente para as guias maiores, que se fixam à base da mesa xy, considerando que cada eixo suporta uma carga centrada $P = 30 \text{ N}$, obteve-se

$$d \geq 6,6 \text{ mm}$$

As guias lineares comerciais mais econômicas que satisfazem essas condições são as guias de $\phi 6 \text{ mm}$ e de $\phi 8 \text{ mm}$. As guias maiores terão pés de apoio parafusados, para que a guia não fique apoiada apenas na extremidades. Isso permite que o diâmetro da guia permaneça o mesmo quando a mesa xy for projetada em escala natural (1:1), economizando material. Por esse motivo, o *pillow block* usado nas guias maiores precisa ser aberto. Porém, com só foi encontrado *pillow block* aberto de $\phi 12 \text{ mm}$, o protótipo foi construído com o eixo maior com $\phi 12 \text{ m}$.

Usou-se a análise de deflexão das barras para auxiliar no seu dimensionamento. Para ambos os carregamentos concentrado e distribuído, a flecha máxima ocorre no centro da guia e pode ser obtida, neste caso, pela fórmula (BEER e JOHNSTON, 1995)

$$y_{\text{máx}} = -\frac{5wL^4}{384EI_x} - \frac{PL^3}{48EI_x}$$

em que E é o módulo de elasticidade longitudinal do material, que para o aço carbono é 207 GPa (BUDYNAS e NISBETT, 2011), e I_x é o momento de inércia da seção transversal em relação à linha neutra. A guia maior, de $\phi 12 \text{ mm}$, apresentará deflexão máxima de 1 mm apenas. Se a guia menor for a de $\phi 6 \text{ mm}$, ela sofrerá deflexão de $4,8 \text{ mm}$, o que é indesejável para o correto funcionamento do equipamento. A guia menor terá então $\phi 8 \text{ mm}$, com flecha máxima de $2,5 \text{ mm}$.

8.5-APÊNDICE E – ESPECIFICAÇÃO DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO POR POLIAS E CORREIAS

Correias sincronizadoras são uma alternativa com bom custo benefício para sistemas de movimentação linear e aplicações de posicionamento, necessitando de pouca manutenção. São comumente utilizadas em equipamentos de escritório, como impressoras, e sistemas de transporte de produtos (GATES, 2000).

A especificação do sistema de transmissão para aplicações de movimentação linear consiste em comparar a tensão máxima requerida com a tensão de trabalho (T_a) suportada pela correia para escolha apropriada de sua largura (GATES, 2000). A tensão máxima na correia é obtida pelas fórmulas

$$F = m_L a + F_{at}$$

$$F_{at} = m_L g \mu$$

em que

F é a força de tração sobre o carro ou a tensão na correia;

m_L é a massa da carga;

a é a aceleração máxima desejada para o carro de translação;

F_{at} é a força de atrito máxima sofrida pela carga;

g é a aceleração da gravidade;

μ é o coeficiente de atrito cinético das superfícies deslizantes;

A seguir, são dados valores para as variáveis da correia menor.

$$m_L = 3,0 \text{ kg}$$

$$a = 0,2 \text{ m/s}$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$\mu = 0,01 \text{ (SKF, 2011)}$$

Resolvendo as equações anteriores, obteve-se

$$F = 0,9 \text{ N (0,20 lbf)}$$

Resolvendo-se similarmente para a correia maior, com $m_L = 4,6 \text{ kg}$, obteve-se

$$F = 1,4 \text{ N (0,31 lbf)}$$

A correia de perfil GT 2 é muito utilizada para aplicações de posicionamento envolvendo cargas leves, como impressoras 3D, é muito disponível no mercado, e possui preço bem acessível. A correia Power Grip GT 2 com passo de 2 mm e 6 mm de largura possui tensão de trabalho de 6 *lb*.

8.6-APÊNDICE F – ESPECIFICAÇÃO DOS MOTORES DE PASSO

Esta seção tem por objetivo explanar os cálculos realizados para obter o torque e a potência necessários aos motores de passo para que a carga seja acelerada até a velocidade máxima desejada. O sistema realiza transmissão mecânica por polia e correia. O torque requerido pelo motor é obtido pelo conjunto de equações (MACHADO, 2015 *apud* AKIYAMA, 2015):

$$\tau_m = K_S(\tau_a + \tau_L)$$

em que

K_S é um fator de segurança (valor de referência de 1,5 a 2,0)

τ_m é o torque gerado pelo motor;

τ_a é o torque de aceleração;

τ_L é o torque de carga;

$$\tau_a = I \frac{a}{r}$$
$$\tau_L = \frac{F_{at}r}{\eta}$$

$$F_{at} = m_L g \mu$$

sendo

I é o momento de inércia total do sistema;

a é a aceleração máxima desejada do carro de translação;

r é o raio da polia sincronizadora;

F_{at} é a força de atrito máxima sofrida pela carga;

η é a eficiência do sistema de transmissão (valor de referência de 0,85 a 0,95);

m_L é a massa da carga;

g é a aceleração da gravidade;

μ é o coeficiente de atrito cinético das superfícies deslizantes;

$$I = I_L + I_P + I_B + I_M$$

em que

I_L é o momento de inércia da carga;

I_P é o somatório dos momentos de inércia das polias;

I_C é o momento de inércia da correia;

I_M é o momento de inércia do motor;

$$I_L = m_L r^2$$

$$I_P = 2m_P r^2$$

$$I_B = m_B r^2$$

sendo

m_P é a massa da polia; e

m_B é a massa da correia;

A seguir, são dados valores para as variáveis do motor 1.

$$K_S = 2$$

$$a = 0,2 \text{ m/s}$$

$$r = 6,37 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$\eta = 90\%$$

$$m_L = 3 \text{ kg}$$

$$m_P = 7,3 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$$

$$m_B = 0,10 \text{ kg}$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$\mu = 0,01 \text{ (SKF, 2011)}$$

Foi dado um valor inicial esperado para a inércia do motores,

$$I_M = 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Substituindo os valores nas equações acima, obtém-se

$$\tau_m = 0,012 \text{ Nm (0,13 kgf} \cdot \text{cm)}$$

A demanda de potência mecânica para realizar o movimento é obtida multiplicando a força de tração, F , pela velocidade máxima desejada (TANAKA, 2013):

$$P_m = F \cdot v_{\text{máx}}$$

$$F = m_L a + F_{at}$$

Sabendo-se que a velocidade máxima dos carros de translação foi convencionalizada em $0,2 \text{ m/s}$, resolvendo pra o motor 1, encontrou-se

$$P_m = 0,9 \cdot 0,2 = 0,18 \text{ W}$$

Resolvendo-se similarmente para o motor 2, que se fixa à base da mesa xy, com a diferença de que $m_L = 4,6 \text{ kg}$, obteve-se

$$\tau_m = 0,018 \text{ Nm } (0,18 \text{ kgf} \cdot \text{cm})$$

$$P_m = 1,4 \cdot 0,2 = 0,28 \text{ W}$$