

CLÁUDIO MASSUMI ODA NISHIMURA

JOSÉ ROBERTO MORENO JÚNIOR

RICARDO VAZ DOS SANTOS JÚNIOR

**PROJETO E FABRICAÇÃO DE ROBÔ
PARA INSPEÇÃO DE LOCAIS PERIGOSOS**

Trabalho de formatura apresentado ao
Departamento de Engenharia Mecatrônica e
Sistemas Mecânicos da Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo

Área de Concentração: Engenharia Mecatrônica

Orientador: Prof. Dr. Lucas Antonio Moscato

São Paulo

2004

CLÁUDIO MASSUMI ODA NISHIMURA
JOSÉ ROBERTO MORENO JÚNIOR
RICARDO VAZ DOS SANTOS JÚNIOR

nota final
10,1 dez'



PROJETO E FABRICAÇÃO DE ROBÔ
PARA INSPEÇÃO DE LOCAIS PERIGOSOS

Trabalho de formatura apresentado ao
Departamento de Engenharia Mecatrônica e
Sistemas Mecânicos da Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo

São Paulo

2004

**CLÁUDIO MASSUMI ODA NISHIMURA
JOSÉ ROBERTO MORENO JÚNIOR
RICARDO VAZ DOS SANTOS JÚNIOR**

**PROJETO E FABRICAÇÃO DE ROBÔ
PARA INSPEÇÃO DE LOCAIS PERIGOSOS**

Trabalho de formatura apresentado ao
Departamento de Engenharia Mecatrônica e
Sistemas Mecânicos da Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo

Área de Concentração: Engenharia Mecatrônica
Orientador: Prof. Dr. Lucas Antonio Moscato

**São Paulo
2004**

*Aos nossos pais, pelo apoio constante
e incondicional, sem os quais este sonho
jamais se tornaria realidade.*

Agradecimentos

Ao professor Lucas Antonio Moscato, pelo apoio ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

À CAPES.

À FDTE.

À escola Senai Mariano Ferraz, especialmente ao Srs. Alexandre Capelli e José Edson Silva, pelo inestimável apoio técnico dado.

Às empresas que nos apoiaram e acreditaram que este trabalho pudesse ser realizado.

A todos que diretamente ou indiretamente contribuíram para a execução deste trabalho.

Resumo

O presente trabalho tem por objetivos realizar o projeto e construção de um protótipo de robô para inspeção de locais onde notoriamente há riscos à presença humana, ou então ela é inviável por questões de impossibilidade de acesso. Buscou-se ao longo do desenvolvimento do equipamento, dar ao mesmo uma grande versatilidade de utilização, seja pela capacidade de transito em terrenos irregulares, seja pela possibilidade de utilização de diferentes tipos de equipamento de monitoração. Foi possível, após uma etapa preliminar de avaliação e posteriormente projeto, garantir o baixo custo do equipamento frente a similares não nacionais, fato este que foi uma das principais motivações do projeto. Numa primeira etapa, as ênfases dadas foram na realização do projeto mecânico (braço articulado, estrutura principal, sistema de locomoção - incluindo polias e esteiras - e mecanismo de articulação do braço) e circuitos de acionamento de motores (incluindo lógica de acionamento, eletrônica de potência). Para o projeto mecânico, utilizou-se ferramentas de simulação computacional, baseadas no método dos elementos finitos, bem como sistemas CAD para modelagem sólida e posterior análise de interferências entre componentes. Na segunda parte, um protótipo foi construído e testado a fim de validar os projetos mecânico e eletrônico realizados, cujos resultados foram muito bons, uma vez que o equipamento foi capaz de cumprir a tarefa para o qual foi projetado.

Abstract

This work has as main objectives the design and manufacturing of a robot to realize inspections in places that offers risks to the human presence or it is not possible by reasons of accessibility. We looked during the development phase to give a high utilization versatility through its locomotion system, that allows it to transit in irregular floors and for the possibility of future implementations of different kinds of monitoring systems. It was possible, after an initial evaluation stage (and after with the design) to guarantee the low equipment cost when compared to not made in Brazil similar equipments, and this fact was one of the main motivations of this project. In a first stage, the mechanical design (articulated arms, main structure, locomotion system including pulleys and caterpillars - and arm articulation mechanism were emphasized, as well as the motor driver circuits (including power electronics and logic). To the mechanical design, were used computational simulation tools based on the finite element method, as well as a CAD system to the solid modeling and later interference analysis between parts. In the second stage, a prototype was manufactured and tested with the purpose of validate the mechanical and electronic designs, and whose results were very good, and the equipment was able to realize the task that it was designed to.

Índice

1. INTRODUÇÃO	18
2. REQUISITOS DE PROJETO.....	19
2.1. SUBIDA DE ESCADAS	19
2.2. VELOCIDADE DE ACIONAMENTO	20
2.3. TIPO DE TERRENO ACEITO	20
2.4. CONTROLE EFETUADO REMOTAMENTE.....	20
3. SISTEMA MECÂNICO	20
3.1. SISTEMA DE LOCOMOÇÃO	20
3.1.1. Escolha do sistema de locomoção.....	20
3.1.1.1. Considerações sobre as esteiras.....	21
3.1.1.2. Projeto da esteira	22
3.1.1.3. Geometria final das peças	29
3.1.2. Polias	30
3.1.2.1. Diretrizes Gerais de Projeto	30
3.1.2.2. Seleção de Materiais.....	30
3.1.2.3. Considerações sobre pré-tensão	31
3.1.2.4. Geometria Final das Peças	32
3.1.3. Esticadores das esteiras	34
3.2. BRAÇO ARTICULADO	37
3.2.1. Geometria	37
3.2.2. Simulações do braço.....	38
3.2.2.1. Alternativa 1 – perfil com 50 mm de comprimento	39
3.2.2.2. Alternativa 2 – perfil com 60 mm de comprimento	41
3.2.2.3. Alternativa 3 – perfil com 70 mm de comprimento	42
3.3. MECANISMO DE ARTICULAÇÃO DO BRAÇO	44
3.3.1. Especificação do torque necessário para desvirar o robô.....	44
3.3.1.1. Estimativa da massa e centro de gravidade dos elementos	44
3.3.1.2. Estimativa da massa e do centro de gravidade do robô.....	48
3.3.1.3. Estimativa do torque necessário para desvirar o robô.....	49

3.3.2.	Alternativas de solução	50
3.3.2.1.	Alternativa 1	51
3.3.2.2.	Alternativa 2	53
3.3.2.3.	Alternativa 3	56
3.3.3.	Escolha da solução	58
3.3.4.	Detalhamento da solução escolhida	61
3.3.4.1.	Seleção das polias e correias sincronizadoras	64
3.3.4.2.	Transmissão por rosca sem fim	68
3.4.	ESTRUTURA	78
3.4.1.	Diretrizes gerais de projeto.....	78
3.4.2.	Simulações computacionais de alternativas de estruturas utilizando o método dos elementos finitos (MEF)	79
3.4.2.1.	Estrutura simples com reforço lateral de perfil “T”	80
3.4.2.2.	Estrutura com borda e reforço lateral de perfil T	82
3.4.2.3.	Estrutura com borda e reforço lateral de perfil T maior.....	84
3.4.2.4.	Estrutura com borda e reforço lateral de perfil retangular	85
3.5.	CONJUNTO TRASEIRO (EIXO E MANCAL)	87
3.5.1.	Dimensões desejadas para o eixo traseiro	87
3.5.2.	Geometria proposta da peça	90
3.5.3.	Análise por elementos finitos	91
3.5.4.	Projeto do mancal traseiro.....	93
3.5.5.	Análise por Elementos Finitos	94
3.6.	EIXO DIANTEIRO.....	96
3.6.1.	Simulação do eixo	96
3.6.1.1.	Eixo de 10 mm	97
3.6.1.2.	Eixo de 10 mm com rasgo de chaveta arredondado.....	100
3.6.1.3.	Eixo de 12 mm	102
3.7.	GUIA DA ESTEIRA DO BRAÇO	105
3.7.1.	Diretrizes Gerais de Projeto	105
3.7.2.	Descrição das soluções encontradas.....	105
3.7.3.	Detalhamento da solução escolhida	107
3.8.	ATUADORES	108

3.8.1.	Locomoção	108
3.8.1.1.	Dimensionamento dos motores	108
3.8.2.	Articulação do Braço.....	111
3.9.	MODELO CAD FINAL	111
3.10.	MONTAGEM E AJUSTES.....	114
4.	ELETRÔNICA DE POTÊNCIA E COMANDO	118
4.1.	DESCRIÇÃO GERAL DO SISTEMA	118
4.2.	LÓGICA DE ACIONAMENTO DOS MOTORES PARA TRAÇÃO	118
4.3.	LÓGICA DE ACIONAMENTO DO MOTOR DO BRAÇO	125
4.4.	ASPECTOS GERAIS E MUDANÇAS OCORRIDAS NO PROJETO DO MÓDULO DE CONTROLE	126
4.5.	DETALHAMENTO DOS ELEMENTOS DO MÓDULO DE CONTROLE.....	135
4.5.1.	Microcontrolador ATMEL AT89S8252	135
4.5.2.	Cristal de Quartzo.....	140
4.5.3.	Optoacopladores.....	141
4.5.4.	Switch analógico	142
4.5.5.	Fabricação do circuito impresso e montagem da placa de controle .	144
4.5.6.	Procedimentos da programação do microcontrolador.....	146
4.5.7.	Relação entre <i>hardware</i> e <i>software</i>	149
4.5.8.	O esquema elétrico do módulo.....	150
4.5.9.	Relação de componentes e custos	153
4.6.	JOYSTICK.....	155
4.6.1.	Esquema elétrico	156
4.6.2.	Relação entre os botões e os pinos do conector	157
4.7.	PONTES H.....	158
4.7.1.	Descrição e princípio de funcionamento.....	158
4.7.2.	Circuito.....	159
4.7.3.	Componentes utilizados e circuito final	162
4.7.4.	Análise comparativa e custos	163
4.8.	OUTRO MODO DE ACIONAR OS MOTORES	164
4.8.1.	Descrição dos componentes	165
4.8.2.	Especificação dos componentes:.....	166

4.9.	CIRCUITO CONVERSOR RS232 – TTL	169
4.9.1.	Descrição	169
4.9.2.	Circuito	170
4.9.3.	Componentes utilizados, custos e circuito final	171
4.9.4.	Testes integrados	172
5.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE MELHORIAS FUTURAS.....	175
5.1.	RESULTADOS DOS TESTES DO PROTÓTIPO	175
5.2.	SUGESTÕES DE MELHORIAS	175
6.	BIBLIOGRAFIA.....	176
6.1.	LIVROS	176
6.2.	INTERNET	177
6.3.	CATÁLOGOS DE FABRICANTES.....	177
6.4.	PROGRAMAS.....	178
ANEXO A - CÓDIGO FONTE DO PROGRAMA DO		
MICROCONTROLADOR.....		179
ANEXO B - DOCUMENTAÇÃO MECÂNICA		186

Lista de figuras

FIGURA 1: MEDIDAS DA ESCADA.....	19
FIGURA 2: FORÇAS NO PLANO INCLINADO	23
FIGURA 3: PRIMEIRO ENSAIO DE BORRACHA FEITO.....	24
FIGURA 4: SEGUNDO ENSAIO DE BORRACHA	25
FIGURA 5: SEGUNDO ENSAIO DE BORRACHA, VISTA SUPERIOR.....	25
FIGURA 6: SEGUNDO ENSAIO DE BORRACHA, VISTA LATERAL.....	26
FIGURA 7: CORREIA PROJETADA	27
FIGURA 8: MOLDE DA CORREIA EM VISTA EXPLODIDA	28
FIGURA 9: MOLDE DA CORREIA, PEÇA PRONTA	28
FIGURA 10: ESTEIRA DO BRAÇO EM DETALHE:	29
FIGURA 11: ESQUEMA DO SISTEMA DE ESTEIRAS - FORÇAS ATUANTES.....	31
FIGURA 12: POLIA PEQUENA ($\Phi=70$ MM).....	33
FIGURA 13: POLIA GRANDE ($\Phi=120$ MM).....	33
FIGURA 14: REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO ROBÔ SUPERANDO OBSTÁCULO (SEM ESTICADORES).	34
FIGURA 15: REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO ROBÔ SUPERANDO OBSTÁCULO (COM ESTICADORES).	34
FIGURA 16: PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DOS ESTICADORES.	35
FIGURA 17: MODELO CAD DO CONJUNTO DE ESTICADORES.	36
FIGURA 18: MONTAGEM FINAL DOS ESTICADORES NO PROTÓTIPO	36
FIGURA 19: DETALHE DO SISTEMA ATUANDO (OBSTÁCULO: ESCADAS)	36
FIGURA 20: SUBIDA DE ESCADAS	37
FIGURA 21: BRAÇO ARTICULADO (1)	38
FIGURA 22: BRAÇO ARTICULADO (2)	38
FIGURA 23: MODELO COM PERFIL EM U DE 50 MM DE COMPRIMENTO	39
FIGURA 24: DISTRIBUIÇÃO DA TENSÃO DE VON MISES	40
FIGURA 25: DEFLEXÃO RESULTANTE	40
FIGURA 26: MODELO COM PERFIL EM U DE 60 MM DE COMPRIMENTO	41
FIGURA 27: DISTRIBUIÇÃO DA TENSÃO DE VON MISES	41
FIGURA 28: DEFLEXÃO RESULTANTE	42

FIGURA 29: MODELO COM PERFIL EM U DE 70 MM	42
FIGURA 30: DISTRIBUIÇÃO DA TENSÃO DE VON MISES	43
FIGURA 31: DEFLEXÃO RESULTANTE	43
FIGURA 32: REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS ELEMENTOS.	45
FIGURA 33: ROBÔ DESVIRANDO COM SEU CG DENTRO, E FORA, DA FAIXA DE ATUAÇÃO DO BRAÇO.....	49
FIGURA 34: MECANISMO DE TRANSMISSÃO DE MOVIMENTO AO BRAÇO (ALTERNATIVA 1).....	51
FIGURA 35: VISTA EM CORTE DA ALTERNATIVA 1	52
FIGURA 36: VISTA EM CORTE DA ALTERNATIVA 1	53
FIGURA 37: MECANISMO DE TRANSMISSÃO DE MOVIMENTO AO BRAÇO (ALTERNATIVA 2 DE SOLUÇÃO).....	54
FIGURA 38: VISTA EM CORTE DA ALTERNATIVA 2 DE SOLUÇÃO.....	55
FIGURA 39: VISTA EM CORTE DA ALTERNATIVA 2 DE SOLUÇÃO.....	55
FIGURA 40: MECANISMO DE TRANSMISSÃO DE MOVIMENTO AO BRAÇO (ALTERNATIVA 3 DE SOLUÇÃO).....	56
FIGURA 41: MECANISMO DE TRANSMISSÃO DE MOVIMENTO AO BRAÇO (ALTERNATIVA 3 DE SOLUÇÃO).....	57
FIGURA 42: VISTA EM CORTE DA ALTERNATIVA 3 DE SOLUÇÃO.....	57
FIGURA 43: VISTA EM CORTE DA ALTERNATIVA 3 DE SOLUÇÃO.....	58
FIGURA 44: IMAGEM 2D DA SOLUÇÃO ESCOLHIDA (ALTERNATIVA 3).....	62
FIGURA 45: MECANISMO DE ARTICULAÇÃO DO BRAÇO	63
FIGURA 46: PAR SEM FIM	63
FIGURA 47: TABELA DE SELEÇÃO DE PASSO PARA CORREIAS	65
FIGURA 48: REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA TRANSMISSÃO COM MOTORREDUTOR DE DUPLA SAÍDA	69
FIGURA 49: CURVA DO MOTORREDUTOR A SER UTILIZADO.	70
FIGURA 50: REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA TRANSMISSÃO COM MOTORREDUTOR DE SAÍDA SIMPLES.	71
FIGURA 51: TELA PARA ENTRADA DE DADOS, NO SOFTWARE “COROA E SEM-FIM”	73
FIGURA 52: DESENHO DA COROA E PARAFUSO SEM FIM, FORNECIDOS PELO SOFTWARE “COROA E SEM-FIM”.....	74

FIGURA 53: REPRESENTAÇÃO: PRINCIPAIS DIMENSÕES DO SEM FIM, LINHA DA ESTEIRA E DISTÂNCIA ENTRE CENTROS DO EIXO DO MOTOR E LINHA DA ESTEIRA.	77
FIGURA 54: PAR SEM FIM	78
FIGURA 55: CARREGAMENTOS NA ESTRUTURA	80
FIGURA 56: PERFIL T	80
FIGURA 57: DEFORMAÇÕES NA ESTRUTURA SIMPLES	81
FIGURA 58: TENSÕES NA ESTRUTURA SIMPLES.....	81
FIGURA 59: DOBRA DIANTEIRA EM DETALHE	82
FIGURA 60: DESLOCAMENTOS NA ESTRUTURA COM REFORÇO "T"	83
FIGURA 61: TENSÕES NA ESTRUTURA COM REFORÇO "T"	83
FIGURA 62: PERFIL T DE MAIOR DIMENSÃO	84
FIGURA 63: DEFORMAÇÕES NA ESTRUTURA COM REFORÇO "T" DE MAIOR DIMENSÃO	84
FIGURA 64: TENSÕES NA ESTRUTURA COM REFORÇO "T" DE MAIOR DIMENSÃO.....	85
FIGURA 65: PERFIL RETANGULAR	85
FIGURA 66: DESLOCAMENTO NA ESTRUTURA COM REFORÇO QUADRADO	86
FIGURA 67: TENSÕES NA ESTRUTURA COM REFORÇO QUADRADO	87
FIGURA 68: MODELO DO EIXO TRASEIRO (MEDIDAS EM MM).....	87
FIGURA 69: DIAGRAMA DE TENSÕES	88
FIGURA 70: ESTADO DE TENSÕES	89
FIGURA 71: EIXO TRASEIRO EM DETALHE(1).....	90
FIGURA 72: EIXO TRASEIRO EM DETALHE (2).....	91
FIGURA 73: POLIA MONTADA NO EIXO TRASEIRO	91
FIGURA 74: MODELO IMPORTADO NO PROGRAMA	92
FIGURA 75: DISTRIBUIÇÃO DAS TENSÕES DE VON MISES	92
FIGURA 76: DESLOCAMENTO RESULTANTE	93
FIGURA 77: MANCAL TRASEIRO	94
FIGURA 78: MODELO UTILIZADO.....	95
FIGURA 79: TENSÕES DE VON MISES	95
FIGURA 80: DEFLEXÃO RESULTANTE	96
FIGURA 81: CARREGAMENTO DO EIXO DIANTEIRO	97
FIGURA 82: MODELO DO PRIMEIRO EIXO	97
FIGURA 83: TENSÕES DE VON MISES	98

FIGURA 84: DETALHE DA REGIÃO DE MAIOR TENSÃO.....	98
FIGURA 85: DEFLEXÃO DO EIXO.....	99
FIGURA 86: PONTOS DE ESCOAMENTO.....	99
FIGURA 87: DISTRIBUIÇÃO DAS TENSÕES DE VON MISES.....	100
FIGURA 88: DETALHE DA REGIÃO DE MAIOR TENSÃO.....	100
FIGURA 89: DEFLEXÃO DO EIXO.....	101
FIGURA 90: PONTOS DE ESCOAMENTO.....	101
FIGURA 91: MODELO DO TERCEIRO EIXO	102
FIGURA 92: DISTRIBUIÇÃO DAS TENSÕES DE VON MISES.....	102
FIGURA 93: DETALHE DA REGIÃO DE MAIOR TENSÃO.....	103
FIGURA 94: DEFLEXÃO DO EIXO.....	103
FIGURA 95: PONTOS DE ESCOAMENTO.....	104
FIGURA 96: GUIA DA CORREIA DO BRAÇO	107
FIGURA 97: GUIA SENDO MONTADA NO BRAÇO.....	107
FIGURA 98: FORÇAS ATUANTES	109
FIGURA 99: MOTORREDUTOR FPG.....	110
FIGURA 100: DESENHO DO MOTORREDUTOR FPG.....	111
FIGURA 101: MODELO SÓLIDO DO ROBÔ (1).....	112
FIGURA 102: MODELO SÓLIDO DO ROBÔ (2).....	112
FIGURA 103: MODELO SÓLIDO DO ROBÔ - DETALHE DO BRAÇO	113
FIGURA 104: MODELO SÓLIDO DO ROBÔ (4) - DETALHE DO MECANISMO DE ACIONAMENTO DO BRAÇO	113
FIGURA 105: MODELO SÓLIDO DO ROBÔ (5).....	114
FIGURA 106: ONDULAÇÕES NA ESTEIRA.....	116
FIGURA 107: ACOPLAMNETO DIANTEIRO	116
FIGURA 108: BRAÇO DIANTEIRO	117
FIGURA 109: DIAGRAMA DE BLOCOS DO SISTEMA ELÉTRICO.....	118
FIGURA 110: DISPOSIÇÃO DOS MOTORES	119
FIGURA 111: CIRCUITO LÓGICO DE ACIONAMENTO DOS MOTORES VERSÃO 1	121
FIGURA 112: CIRUITO LÓGICO DE ACIONAMENTO DOS MOTORES PARCIALMENTE OTIMIZADO	122
FIGURA 113: CIRCUITO LÓGICO PARA ACIONAMENTO DE MOTORES VERSÃO FINAL ..	124

FIGURA 114: CIRCUITO LÓGICO PARA ACIONAMENTO DE MOTORES COM CI'S	124
FIGURA 115: ACIONAMENTO DO MOTOR DO BRAÇO	125
FIGURA 116: CIRCUITO LÓGICO PARA ACIONAMENTO DO MOTOR DO BRAÇO	126
FIGURA 117: SIMULAÇÃO DO MÓDULO DE CONTROLE DESENVOLVIDO INICIALMENTE	127
FIGURA 118: SIMULAÇÃO DO CIRCUITO PARA DUAS ENTRADAS SIMULTÂNEAS ("FRENTE" E "DIREITA")	128
FIGURA 119: DIAGRAMA DE BLOCOS DA MOVIMENTAÇÃO DO ROBÔ	129
FIGURA 120: ANÁLISE DO FUNCIONAMENTO DO MÓDULO DE CONTROLE.	130
FIGURA 121: FOTO DO MÓDULO DE CONTROLE	132
FIGURA 122: REGULADOR DE TENSÃO LM7805.....	132
FIGURA 123: CONECTORES J10 E DB9.....	133
FIGURA 124: MICROCONTROLADOR, OPTOACOPADORES, LED'S E REGULADOR DE TENSÃO	133
FIGURA 125: LAYOUT DA PLACA DE CONTROLE	134
FIGURA 126: VERSÃO FINAL DA PLACA DE CONTROLE	135
FIGURA 127: PINAGEM DO AT89S8252	136
FIGURA 128: DIAGRAMA DE BLOCOS REPRESENTANDO O FUNCIONAMENTO DO AT89S8252	137
FIGURA 129: ESQUEMA PARA PROGRAMAÇÃO PARALELA DAS MEMÓRIAS FLASH E EEPROM.....	138
FIGURA 130: ESQUEMA PARA VERIFICAÇÃO PARALELA DAS MEMÓRIAS FLASH E EEPROM.....	139
FIGURA 131: ESQUEMA PARA PROGRAMAÇÃO SERIAL DAS MEMÓRIAS FLASH E EEPROM.....	139
FIGURA 132: MICROCONTROLADOR ATMEL AT89S8252.....	140
FIGURA 133: REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DAS CONEXÕES PARA O OSCILADOR..	140
FIGURA 134: CRISTAL DE QUARTZO DE 12 MHZ UTILIZADO NO MÓDULO DE CONTROLE	141
FIGURA 135: REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO OPTOACOPADOR	142
FIGURA 136: OPTOACOPADORES TIL111, NO MÓDULO DE CONTROLE.....	142
FIGURA 137: REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO SWITCH	143

FIGURA 138: FOTO DO SWITCH 4066	143
FIGURA 139: ESQUEMA ELÉTRICO DESENHADO NO PROGRAMA EAGLE	144
FIGURA 140: PLACA DURANTE A EXPOSIÇÃO	145
FIGURA 141: PLACA DURANTE E APÓS A EXPOSIÇÃO E REVELAÇÃO	145
FIGURA 142: PLACA APÓS CORROSÃO	146
FIGURA 143: PLACA DE CONTROLE PRONTA.....	146
FIGURA 144: EXEMPLO DE JANELA DO COMPILADOR	147
FIGURA 145: GRAVAÇÃO DO MICROCONTROLADOR.....	148
FIGURA 146: PLACA DE CONTROLE COM O CABO DE GRAVAÇÃO.....	148
FIGURA 147: ESQUEMA ELÉTRICO DO MÓDULO DE CONTROLE	151
FIGURA 148: ACIONAMENTO ATRAVÉS DE LÓGICA INVERSA (ENTRADA DO MICROCONTROLADOR)	152
FIGURA 149: ACIONAMENTO POR LÓGICA INVERSA (SAÍDA DO MICROCONTROLADOR)	153
FIGURA 150: CIRCUITO DE <i>RESET</i> DO MICROCONTROLADOR.....	153
FIGURA 151: <i>JOYSTICK</i> UTILIZADO PARA CONTROLAR O ROBÔ.	156
FIGURA 152: ESQUEMA ELÉTRICO DO JOYSTICK DO ROBÔ.....	157
FIGURA 153: PONTE H GENÉRICA	159
FIGURA 154: CONFIGURAÇÃO DARLINGTON PARA TRANSISTORES.....	160
FIGURA 155: GANHO DE CORRENTE DO TRANSISTOR TIP3055.....	160
FIGURA 156: GANHO DE CORRENTE DO TRANSISTOR BC637	161
FIGURA 157: ESQUEMA ELÉTRICO DA PONTE H.....	161
FIGURA 158: PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO.....	162
FIGURA 159: PONTE H FINAL	163
FIGURA 160: CIRCUITO DE POTÊNCIA DO ROBÔ	165
FIGURA 161: CIRCUITO CHOPPER.....	167
FIGURA 162: GATE DRIVE E MOSFET	168
FIGURA 163: CARACTERÍSTICAS DE SATURAÇÃO DO MOSFET	168
FIGURA 164: ESQUEMA ELÉTRICO DO CIRCUITO CONVERSOS RS232-TTL	170
FIGURA 165: CURVAS DE TENSÃO MAX232	171
FIGURA 166: CIRCUITO CONVERSOR RS232-TTL IMPLEMENTADO.....	172
FIGURA 167: LIGAÇÃO PARA O TESTE DO CONJUNTO.....	172

FIGURA 168: PONTE H, EM DESTAQUE RESISTORES SUBSTITUÍDOS	173
FIGURA 169: PLACA DE CONTROLE	174

Lista de Tabelas

TABELA 1: TABELA DE DECISÃO PARA ESCOLHA DO SISTEMA DE LOCOMOÇÃO	21
TABELA 2: TABELA DE DECISÕES.	60
TABELA 3: DISTÂNCIAS ENTRE CENTROS	66
TABELA 4: POTÊNCIA NOMINAL PERMITIDA (PASSO 5 MM)	67
TABELA 5: FATOR DE CORREÇÃO EM FUNÇÃO DO TAMANHO DA CORREIA	67
TABELA 6: DIMENSÕES DA COROA E DO PARAFUSO SEM FIM	75
TABELA 7: EVOLUÇÃO DOS FATORES DE SEGURANÇA	104
TABELA 8: TABELA DE DECISÃO	106
TABELA 9: TABELA DA VERDADE PARA ACIONAMENTOS	119
TABELA 10: TABELA DA VERDADE DO DECODER.....	123
TABELA 11: LÓGICA DE ACIONAMENTO	125
TABELA 12: LIGAÇÃO ENTRE O MICROCONTROLADOR E O PC.....	147
TABELA 13: RELAÇÃO ENTRE OS COMANDOS, PINO, PORTAS E VARIÁVEIS.....	149
TABELA 14: RELAÇÃO ENTRE VARIÁVEIS, PORTAS, PINOS E AÇÕES	150
TABELA 15: COMPONENTES DA PLACA DE CONTROLE.....	154
TABELA 16: COMPONENTES DA PLACA DE CONTROLE FINAL.....	155
TABELA 17: RELAÇÃO ENTRE BOTÕES, PINOS E VARIÁVEIS DE COMANDO	158
TABELA 18: MATERIAIS UTILIZADOS- PONTE H	162
TABELA 19: COMPARATIVO PRINCIPAIS FORMAS DE MONTAGEM DE UMA PONTE H ..	163
TABELA 20: LISTA DE COMPONENTES DE CADA PONTE H.....	164
TABELA 21: NÍVEIS DE TENSÃO RS232 E TTL	169
TABELA 22: COMPONENTES UTILIZADOS CIRCUITO CONVERSOR.....	171
TABELA 23: COMPARAÇÃO ENTRE A PERFORMANCE INICIAL E FINAL	175

1. INTRODUÇÃO

Substituir o trabalho realizado por humanos pelo trabalho realizado por máquinas tem sido amplamente discutido na última década, seja pela sua crescente utilização na indústria, seja pelas suas implicações. Uma dessas implicações merece destaque, dado o grande impacto social da mesma: o chamado desemprego estrutural, que é aquele causado por mudanças tecnológicas (mecanização, automação novos processos), provocando repentina desqualificação da mão-de-obra e conseqüente desemprego.

Entre tantas discussões, surge uma aplicação em que felizmente é possível aplicar as máquinas para a realização do trabalho ao invés de seres humanos: são as inspeções em locais inóspitos e/ou inacessíveis, onde cada vez mais robôs estão exercendo funções nas quais a presença de seres humanos nos locais da inspeção é inviável (por motivos de falta de espaço ou presença de agentes químicos tóxicos) ou então há riscos à mesma (tais como invasão de locais onde há criminosos e a presença de um policial seria extremamente perigosa).

Dada essa aplicação, nasceu a idéia de construir um robô remotamente operado para cumprir tais tarefas, mas com uma preocupação a mais: empenho total na fase de projeto para que o mesmo seja mais acessível (leia-se menor custo) do que alguns equipamentos de mesma finalidade disponíveis no mercado, tais como o PACKBOT, fabricado pela americana iROBOT, e que custa aproximadamente US\$ 50.000,00, dada a carência de recursos do nosso país.

Assim, decidiu-se projetar um robô com finalidade de realizar inspeções em diversos tipos de locais, seja em solos irregulares, seja em edifícios onde há a necessidade de subir escadas, uma vez que uma das grandes preocupações na fase de projeto foi a versatilidade do equipamento e sua capacidade de enfrentar obstáculos. Por versatilidade entende-se não só a capacidade do mesmo transitar por locais irregulares, mas também pela possibilidade do módulo básico (parte mecânica em si) permitir o acoplamento de diversos tipos de subsistemas de monitoração, tais como câmeras de vigilância, sensores de temperatura, gases e outros, bem como braços manipuladores.

Portanto, todo o trabalho foi feito visando a cumprir os objetivos acima citados, e por fim a construção de um protótipo foi realizada com a finalidade de testarmos o resultado do grande esforço despendido na fase de concepção.

2. REQUISITOS DE PROJETO

Definido o tema, partiu-se para a definição dos requisitos do mesmo, ou seja, tudo aquilo que se deseja do equipamento e também delimitações de funcionalidades bem como restrições de operação. Na sequência serão detalhados os requisitos do projeto

2.1. Subida de escadas

O robô deve ser capaz de subir escadas, sendo que o padrão adotado na definição da geometria dos degraus foi o descrito na norma ABNT NBR9050 - Acessibilidade de pessoas portadoras de deficiências a edificações, espaço mobiliário e equipamentos urbanos, que estabelece os limites de tamanho permitidos para escadas. Segundo esta norma, os degraus devem obedecer às seguintes restrições:

$$0,63 < p+2e < 65$$

$$0,28 < p < 0,32\text{m}$$

$$0,16 < e < 0,18\text{m}$$

em que (observar figura abaixo):

p = comprimento da base do degrau

e = altura do degrau

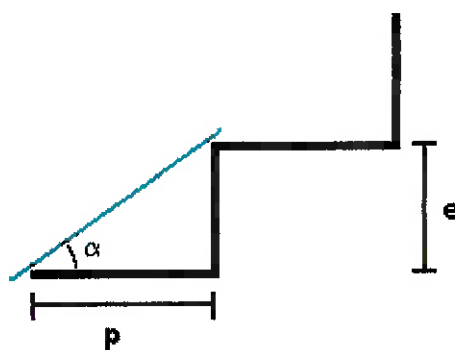


Figura 1: Medidas da escada

Estes valores de restrição fornecem o seguinte caso extremo: para $p = 0,28$ e $e = 0,18$, obtemos um inclinação de $\arctg(18/28)=0,64$, que corresponde a aproximadamente $\alpha=33^\circ$. Esta foi adotada como inclinação máxima a ser transposta pelo equipamento.

2.2. Velocidade de Acionamento

Foi imposta como mínimo aceitável uma velocidade de acionamento da ordem de 0,5m/s em regime permanente, bem como uma aceleração de $0,25\text{m/s}^2$.

2.3. Tipo de Terreno Aceito

O robô deve ser capaz de transitar por terrenos de solo irregular, tais como aqueles onde há presença de pedras, solo arenoso, solos de topologia irregular (aclives, declives, inclinações, etc), mas uma restrição é feita quanto ao trânsito em locais molhados, dada a possibilidade de que água possa fazer o sistema de correias patinar e o robô perder eficiência de locomoção.

2.4. Controle efetuado remotamente

O robô será controlado através de um controle com cordão umbilical. Para o futuro, deixamos a sugestão de que um sistema wireless seja implementado, utilizando rádio frequência, por exemplo.

3. SISTEMA MECÂNICO

3.1. Sistema de Locomoção

3.1.1. Escolha do sistema de locomoção

Devido ao tipo de terreno a ser aceito e a necessidade de se subir escadas, duas soluções principais podem ser destacadas:

- Criar um sistema de pernas para realizar a locomoção;
- Utilizar esteiras.

A escolha da alternativa selecionada ocorreu através da seguinte tabela de decisão:

Tabela 1: Tabela de decisão para escolha do sistema de locomoção

Características	Sistema de Locomoção	
	Movimentação através de pés	Movimentação através de esteiras
Locomoção em terrenos planos	SIM	SIM
Possibilidade de subir escadas	SIM	SIM
Dificuldade de projeto	Grande	Média
Dificuldade de fabricação	Grande	Média

Após a enumeração destas características optou-se pela alternativa que possui a menor complexidade de projeto e de fabricação, bem como apresentava maior robustez. Sendo assim, a alternativa escolhida foi utilizar esteiras para a movimentação do robô.

3.1.1.1. Considerações sobre as esteiras

Existem dois tipos comuns de esteiras, as de metal que são usadas em tanques e máquinas pesadas e as de borracha, estas geralmente usadas em brinquedos e no transporte de objetos.

Frente estas duas opções, a preferência recaiu sobre a esteira de borracha devido ao seu maior coeficiente de atrito. A escolha da esteira inicialmente norteou-se para a compra de alguma correia comercialmente disponível, mas após uma detalhada pesquisa observou-se que infelizmente não existiam correias que atendessem as necessidades do projeto.

As próximas opções analisadas foram a de compra de uma correia seguida de sua adaptação através da usinagem do lado liso ou colagem de uma nova face e o projeto e fabricação de uma esteira própria para o projeto.

Findada a análise destas alternativas, concluiu-se que apesar das duas serem válidas a melhor opção seria o projeto de uma nova correia, porque esta agrega uma grande flexibilidade ao projeto permitindo a livre concepção e até mesmo a escolha da dureza do material. Uma análise mais detalhada do processo de escolha desta alternativa é descrita a seguir.

3.1.1.2. Projeto da esteira

Por este ser um importante ponto deste trabalho, dedicou-se especial atenção ao projeto deste elemento, pois a má concepção do mesmo pode trazer sérios transtornos futuros tais como a sua fácil ruptura, incapacidade de subir escadas, escorregamento da polia durante a movimentação, entre outros. Portanto este componente do robô precisa ser feito de forma a atender as seguintes necessidades:

- Não permitir o escorregamento da polia durante a movimentação;
- Não escorregar ao subir escadas;
- Não desacoplar da polia ao sofrer esforços laterais;
- Ser de fácil fabricação;
- Possuir baixo custo de fabricação.

Ao estudar estes requisitos elaboraram-se as seguintes alternativas de solução.

- a) Correia dentada interna e externamente em polia com ressalto laterais;
- b) Correia dentada interna e externamente e guias longitudinais na face interna;
- c) Correia dentada externamente e internamente lisa em polia com ressalto laterais;
- d) Correia em trapezoidal com dentes na face exterior;
- e) Correia dentada externamente e internamente não dentada, mas com guias longitudinais na face interna.

A fim de realizar uma análise mais detalhada destas soluções foi necessária uma estimativa do coeficiente de atrito de correias planas com polias de metais e de plásticos. Apesar da busca bibliográfica ter sido realizada, não foram encontrados resultados a esse respeito, portanto foram projetados experimentos rápidos para a validação do uso de correias planas.

Em uma primeira tentativa, optou-se por determinar o coeficiente de atrito entre a borracha e o ferro. Para tal o experimento de um plano inclinado foi utilizado, neste basta medir o ângulo formado entre plano e a horizontal quando ocorrer o início do escorregamento, segundo a formulação mostrada a seguir a tangente deste ângulo é o coeficiente de atrito.

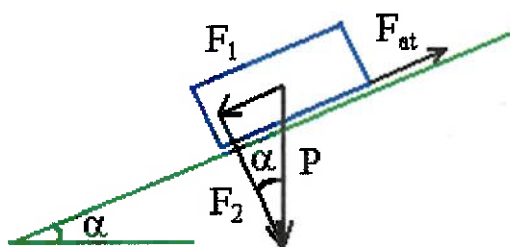


Figura 2: Forças no plano inclinado

Para o Equilíbrio $F_1 = F_{at}$, portanto após alguma manipulação algébrica, chega-se a:

$$\mu = \tan(\alpha)$$

Após alguns testes observou-se que o coeficiente de atrito varia muito de borracha para borracha, mas para os cálculos futuros adotaremos o coeficiente de atrito de 0,7 para o par borracha ferro e 0,8 para o par borracha nylon.

Depois de definido um coeficiente de atrito surgiu outra dúvida, agora com relação à escolha da tração dianteira ou traseira. Para tal elaborou-se outro experimento que pudesse mostrar se é possível evitar o escorregamento da correia internamente lisa apenas com a pré-tensão.

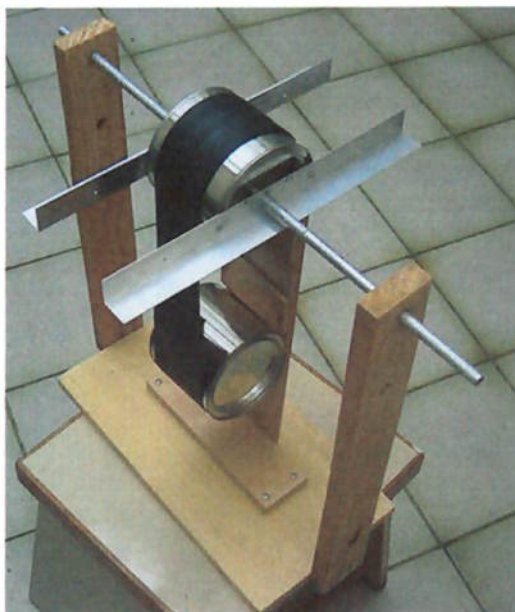


Figura 3: Primeiro ensaio de borracha feito

No primeiro ensaio de borracha a lata de baixo pode ser cheia de pesos e desta forma exercerá a pré-tensão no sistema, o apoio de madeira onde a borracha é presa representa a correia em contato com a escada. Ao exercer uma força na alavanca do lado do apoio de madeira, simula-se a tração dianteira e ao exercer a força no lado oposto simula-se a tração traseira.

O primeiro teste de borracha resultou na conclusão de que se utilizando tração dianteira não é possível impedir o escorregamento da polia, sendo exatamente oposto no caso da tração traseira. Apesar destes resultados desanimadores optou-se por realizar novos ensaios que se aproximassem mais do caso real, portanto necessitou-se de mais um equipamento de teste para borracha. Para aproximar ao máximo este modelo do caso real optou-se por criar uma estrutura com apenas uma das esteiras, mas com as duas polias.

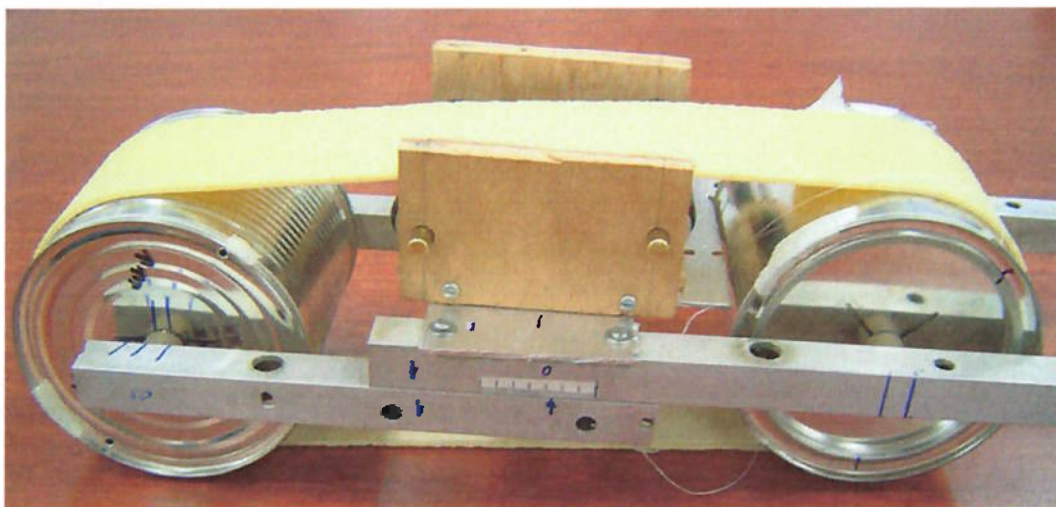


Figura 4: Segundo ensaio de borracha



Figura 5: Segundo ensaio de borracha, vista superior



Figura 6: Segundo ensaio de borracha, vista lateral

Este segundo “aparato experimental” simula tanto a tração dianteira quanto à traseira. Seu princípio de funcionamento se baseia no resultado do plano inclinado, o qual mostra que o coeficiente de atrito não depende da massa do objeto sobre o plano inclinado. Portanto o torque de tração é gerado por meio de pesos amarrados às rodas, desta forma aplica-se a força de maneira uniforme não interferindo diretamente no sistema, porque os pesos apenas incluem componentes verticais de forma a aumentar apenas a massa do carro.

Realizando os novos ensaios percebeu-se que o atrito entre uma polia de metal e a borracha é suficiente para impedir o escorregamento da polia mesmo no caso mais crítico de inclinação da escada, e também se observou que tanto para polias lisas quanto para polias com ressaltos longitudinais obtêm-se os mesmos resultados.

Observou-se também que quanto mais próximo de 90° com a horizontal pior fica o caso do atrito para a tração dianteira, no limite obtêm-se os resultados do primeiro ensaio.

Após estas análises conclui-se que todas as soluções atendem aos requisitos, portanto a escolha da solução mais adequada foi feita considerando-se principalmente a facilidade de fabricação.

As soluções (a) e (b) foram descartadas por serem de difícil fabricação e projeto, porque os dentes internos devem se encaixar na polia que também será feita pelo grupo.

Com relação à (d) observa-se que uma correia trapezoidal atende muito bem a todos os requisitos anteriormente descritos, porém esta opção apresenta um grande problema com relação ao raio mínimo de abraçamento, já que esta é uma correia com grande espessura, portanto esta opção será descartada.

As alternativas (c) e (e) são bem similares, mas em uma análise mais aprofundada conclui-se que a alternativa (c) apresenta algumas pequenas desvantagens em relação à (e). A principal desvantagem da alternativa (c) é a existência dos ressalto laterais na polia, porque estes podem entrar em contato com os degraus e conseqüentemente favorecer o escorregamento.

A alternativa escolhida foi a alternativa (e), cujos desenhos estão expostos a seguir:

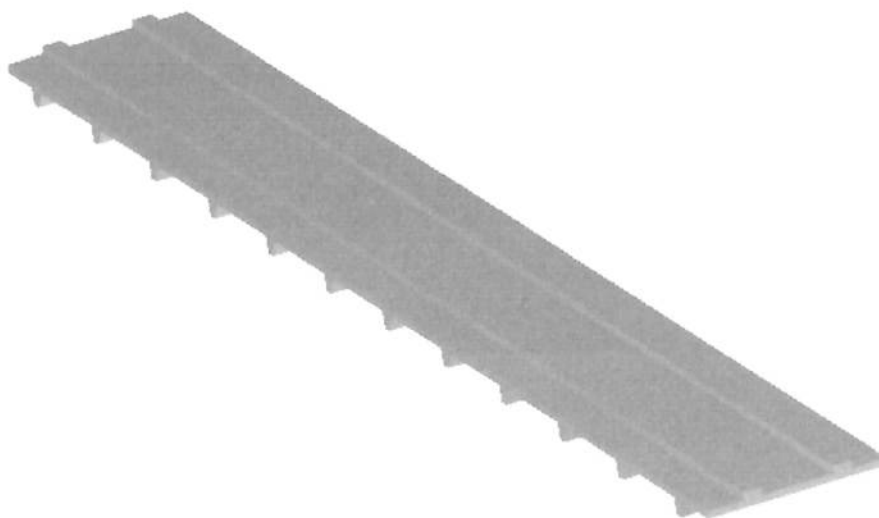


Figura 7: Correia projetada

Para a fabricação desta correia é necessário um molde bipartido, o qual será fabricado em aço ABNT1020, como o mostrado abaixo.

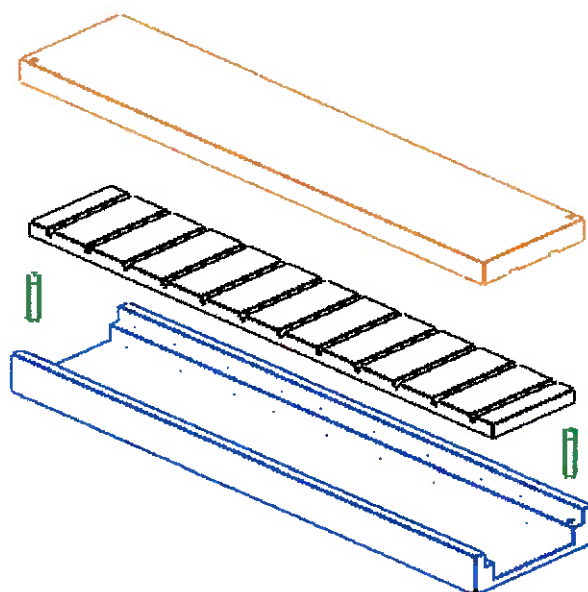


Figura 8: Molde da correia em vista explodida

O molde foi confeccionado em aço ABNT 1020, e foi usinado com o auxílio técnico da Escola SENAI Mariano Ferraz. Abaixo, vemos uma foto ilustrativa da peça pronta.



Figura 9: Molde da correia, peça pronta

3.1.1.3. Geometria final das peças

Após a usinagem do molde e eventuais ajustes, procedeu-se a fabricação das esteiras, sendo que obtivemos auxílio da empresa Black Hubber para tal. O processo da fabricação das esteiras incluía as seguintes etapas:

- Aquecimento da prensa para a vulcanização da borracha
- Inserção da matéria prima (borracha crua e tiras de nylon) na matriz
- Aquecimento por aproximadamente 20 minutos da matriz, a fim de que a borracha se vulcanize

A Figura 10 ilustra a esteira do braço em detalhe.



Figura 10: Esteira do braço em detalhe:

Por se tratar de um componente desenvolvido especialmente para esta aplicação, o processo de fabricação do mesmo foi quase artesanal. Como conseqüências, tivemos que as esteiras maiores apresentaram algumas irregularidades ao longo de sua extensão (ondulações), as quais não chegaram a comprometer significativamente o desempenho do equipamento, mas causaram complicações por apresentarem tendência a se deslocar para fora das polias.

Como observações principais, pode-se dizer que o projeto da esteira em sim deu certo, pois a mesma cumpriu sua função nos ensaios do protótipo, aderindo muito bem às escadas por onde o robô subia.

3.1.2. Polias

3.1.2.1. Diretrizes Gerais de Projeto

O que norteou o projeto das polias foi que as mesmas possuísem:

- Baixo custo de construção;

- Capacidade de locomover o robô;

- Capacidade de operação em ambientes agressivos (umidade, presença de agentes químicos leves);

- Baixo peso, a fim de diminuir o peso global do equipamento;

- Bom coeficiente de atrito com borracha, a fim de transmitir torque suficiente para as esteiras e permitir a locomoção do robô.

3.1.2.2. Seleção de Materiais

Inicialmente, o material mais adequado à fabricação das polias pareceu ser o alumínio, dada a baixa densidade deste metal (comparativamente ao aço por exemplo), assim como a sua grande resistência a corrosão. Por questões de custo e também devido ao fato da densidade do alumínio ser mais que o dobro da densidade de alguns polímeros, o que representaria um acréscimo considerável de peso ao robô, a utilização deste material foi descartado, em detrimento de outro com propriedades muito mais interessantes, que é o Nylon 6.6 extrudado (Poliamida). Este polímero apresenta as seguintes propriedades:

- Temperatura máxima de trabalho: 100°C;

- Ponto de fusão da ordem de 250°C;

- Absorção de água: 1,2% (24h);

- Ótima resistência à abrasão;

- Ótima usinabilidade;

- Resistência a ácidos e bases fracas;

- Densidade de 1,14g/cm³, contra, por exemplo, 2,7g/cm³ do alumínio.

Além disso, possui um custo por quilograma inferior ao alumínio (no mercado, o nylon é vendido por aproximadamente R\$18,00/kg, enquanto que o alumínio é vendido a R\$19,80), o que reduz o custo total do projeto e também o peso. Considerando a fabricação de uma polia com largura 50mm e diâmetro 120mm, sem alívio algum de peso, aquela fabricada em alumínio possui massa de 1,5kg, enquanto que a fabricada em nylon, apenas 0,645kg. Isso corresponde a uma redução de aproximadamente 57% de massa, e uma redução de mais de 5kg na massa total do robô (dado que o mesmo utiliza 6 polias de diâmetro 120mm e duas polias com diâmetro 70mm).

As peças projetadas sofreram um processo de alívio de massa, a fim de diminuir a inércia do robô. A estratégia utilizada foi realizar furos distribuídos no corpo das polias. Sendo assim, os resultados obtidos foram os seguintes:

Polias grandes:

	Massa original	Massa final
Polia motriz largura 50 mm	528g	460g
Polia motriz largura 40 mm	422g	368g

No total, houve uma economia de 516g na massa do equipamento.

3.1.2.3. Considerações sobre pré-tensão

O Sistema de movimentação utilizando esteiras merece atenção especial quanto à pré-tensão necessária para garantir que não haja escorregamento entre a esteira e as polias. Um esquema deste sistema está mostrado na figura abaixo:



Figura 11: Esquema do sistema de esteiras - forças atuantes

Sabendo que $F_{at} = \mu.N$, e neste caso a força normal “N” é equivalente à força de pré-tensão “T”. Algumas hipóteses foram feitas para o dimensionamento da pré-tensão:

- Todo o peso do robô está sendo carregado por apenas uma esteira, situação em que, por exemplo, o mesmo está subindo uma escada apoiado em apenas uma das esteiras;

Considerando o robô subindo uma rampa com inclinação 33° , isto equivale a considerar uma força na direção contrária ao movimento de magnitude 80 N, obtemos:

$$F_{res} = F_{esteira} - 80 = 95 N$$

e portanto, sendo o coeficiente de atrito entre borracha e nylon aproximadamente 0,8, obtemos $T = 118,75 N$.

Sendo $\sigma = \frac{F}{A}$, e $A = 120 \text{ mm}^2$, obtém-se o valor de $\sigma = 0,99 N / \text{mm}^2 = 1 \text{ MPa}$.

Valores comuns do módulo de elasticidade da borracha encontram-se na faixa de $E=0,3$ a $1,5 \text{ MPa}$, e borrachas de baixa deformação possuem $E = 6,8 \text{ MPa}$.

3.1.2.4. Geometria Final das Peças

Imagens dos modelos sólidos gerados em CAD encontram-se abaixo:



Figura 12: Polia pequena ($\Phi=70$ mm)

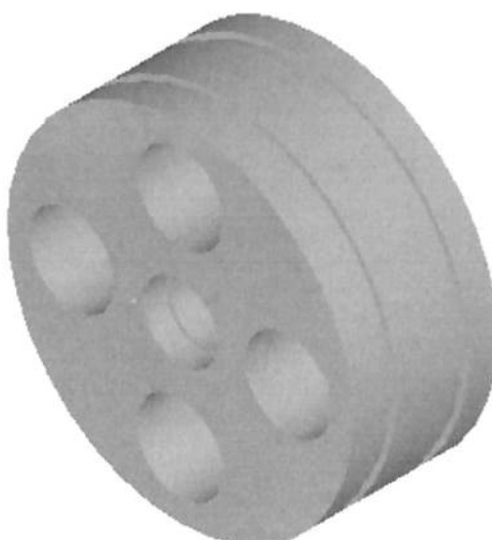


Figura 13: Polia grande ($\Phi=120$ mm)

Para o protótipo, serão utilizadas no total oito polias, sendo duas com diâmetro 70 mm e seis com diâmetro 120 mm. Os diâmetros foram decididos com base no fato de que o robô tem de se manter a uma altura livre do solo de pelo menos 25 mm, para que o mesmo não enrosque em obstáculos tais como pedras, etc.

Quatro polias com diâmetro 120 mm serão utilizadas para o sistema principal de locomoção, onde por sistema principal de locomoção entende-se o conjunto formado por essas quatro polias mais as esteiras de borracha, que constantemente estão em contato com o solo e são responsáveis por realizar a movimentação do robô. As demais polias farão parte do sistema auxiliar de locomoção, sistema este que é

composto por dois braços articulados cuja função é permitir que o robô transponha obstáculos com mais facilidade. Este subsistema será detalhado na sequência.

3.1.3. Esticadores das esteiras

Para realizar a movimentação do robô através de esteiras, alguns problemas podem ser observados, especialmente se a esteira tiver um grande comprimento.

Primeiramente, pode-se destacar o fato de que a esteira tende a se conformar com a superfície do objeto ou obstáculo pelo qual o robô está passando, como por exemplo, ao subir uma escada, onde a borda do degrau faria com que a esteira fosse deformada e por conseguinte o degrau entraria em contato com a superfície inferior da estrutura do robô, prejudicando seu desempenho, conforme ilustrado a seguir:

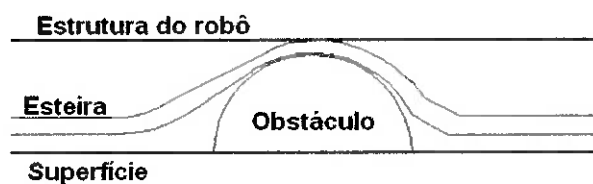


Figura 14: Representação esquemática do robô superando obstáculo (sem esticadores).

Com o intuito de solucionar tal problema, foi projetado um mecanismo que mantém a esteira sempre esticada, independente do tipo de terreno ou obstáculo que o robô procurar superar. Com os esticadores a estrutura se movimenta de acordo com o obstáculo e, dessa forma o obstáculo não atinge a superfície inferior, como acontecia para o caso sem os esticadores. A seguir é ilustrada a nova situação.

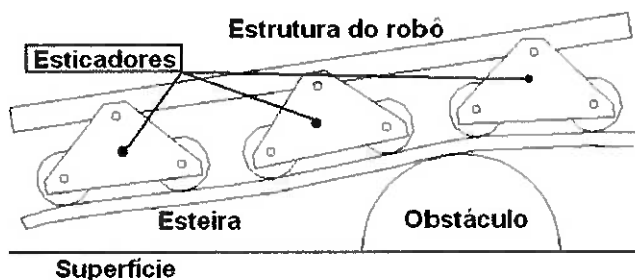


Figura 15: Representação esquemática do robô superando obstáculo (com esticadores).

O esticador possui duas rodas, que diminuem o atrito entre a esteira e o próprio esticador, e um ponto de apoio, que permite que o esticador rotacione ao redor deste ponto. Esta rotação do esticador do esticador é muito importante pelos seguintes aspectos, se ele fosse rígido, sempre que o robô precisasse superar algum obstáculo, sua estrutura estaria sujeita a movimentos bruscos. Com os esticadores móveis, a esteira se deforma (dentro do permitido pelo esticador) e permite uma movimentação mais suave ao robô. O princípio de funcionamento dos esticadores é apresentado a seguir:

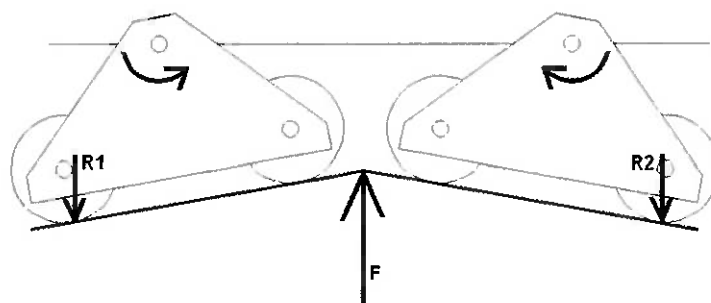


Figura 16: Princípio de funcionamento dos esticadores.

Quando o obstáculo força a deformação da esteira através de uma força F (que empurra a esteira para cima), os esticadores giram, em sentidos opostos, de modo que as rodas mais afastadas do ponto de aplicação de F começam a aplicar uma força ($R1$ e $R2$) empurrando a esteira para baixo, garantindo que a esteira continue esticada.

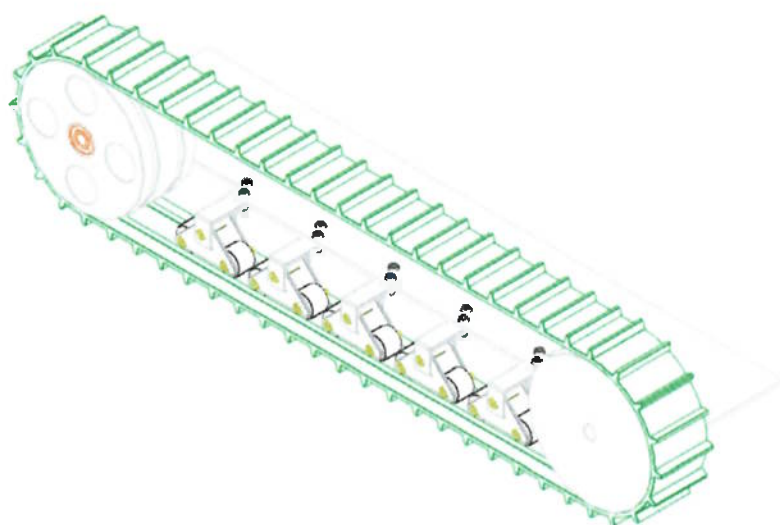


Figura 17: Modelo CAD do conjunto de esticadores.



Figura 18: Montagem final dos esticadores no protótipo



Figura 19: Detalhe do sistema atuando (obstáculo: escadas)

3.2. Braço articulado

A função do braço do robô é permitir que o mesmo suba escadas, bem como em caso de capotamento, permitir que o robô se desvire. Assim, é de vital importância que a estrutura do braço suporte os esforços nessas duas situações.

3.2.1. Geometria

A figura abaixo mostra a subida de escadas pelo robô, ilustrando o papel do braço articulado.

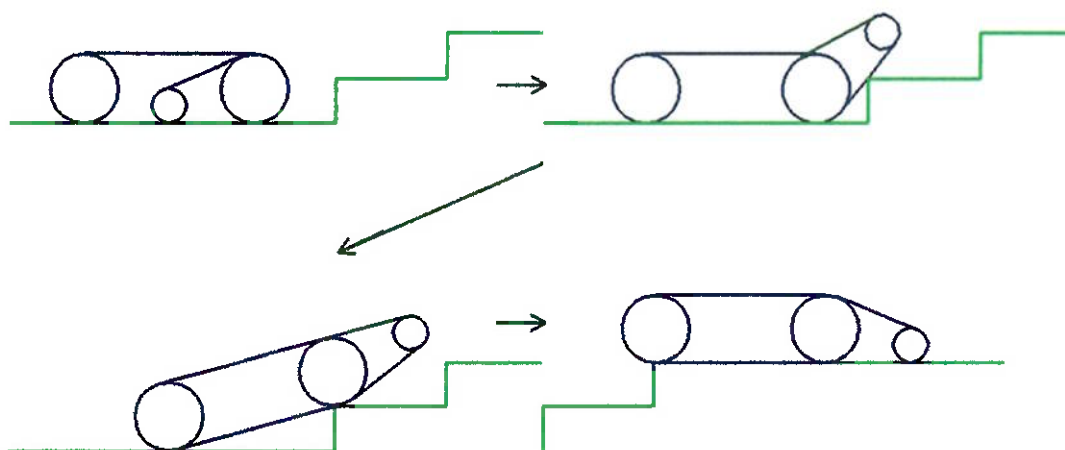


Figura 20: Subida de escadas

As figuras Figura 21 e Figura 22 representam o modelo sólido do braço articulado do robô.

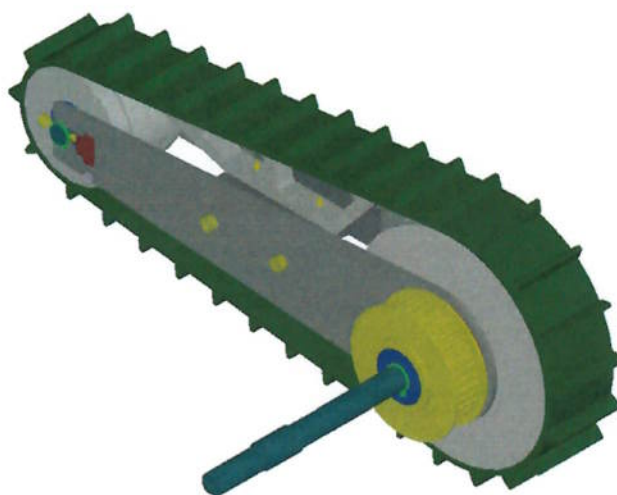


Figura 21: Braço articulado (1)

A parte externa da estrutura (em cinza), será construída em chapa de alumínio de espessura 3mm.

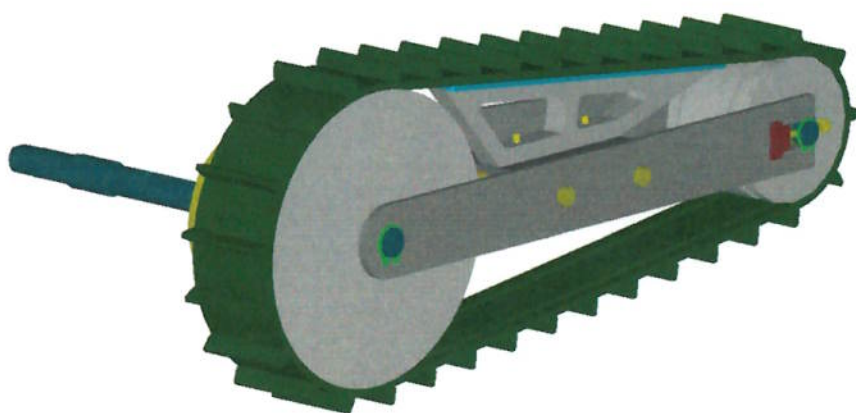


Figura 22: Braço articulado (2)

3.2.2. Simulações do braço

As simulações a seguir visam definir o comprimento da canaleta em U a ser utilizada para unir as chapas laterais do braço.

O carregamento a ser adotado é o que ocorreria caso o robô entrasse diagonalmente na escada, neste é pressuposto que o robô fique com todo seu peso distribuído entre o canto do braço e a roda traseira oposta. Em tal situação obtém-se

uma carga vertical no braço que está a um ângulo de 30° em relação com a horizontal, portanto o braço sofre duas componentes uma vertical e uma longitudinal.

Os modelos serão feitos no programa Cosmos Design Star com os respectivos materiais originais, ou seja, com alumínio, borracha e nylon.

3.2.2.1. Alternativa 1 – perfil com 50 mm de comprimento

Em todas as simulações serão mostrados o modelo, a tensão de Von Mises e a deflexão resultante, para melhorar a visualização dos resultados optou-se por ocultar as polias e as esteiras nas plotagens de tensão e de deflexão.



Figura 23: Modelo com perfil em U de 50 mm de comprimento

Braco 50 v3-Deformao - Static Model Stress
Units : N/mm² Deformation Scale : 1 : 1

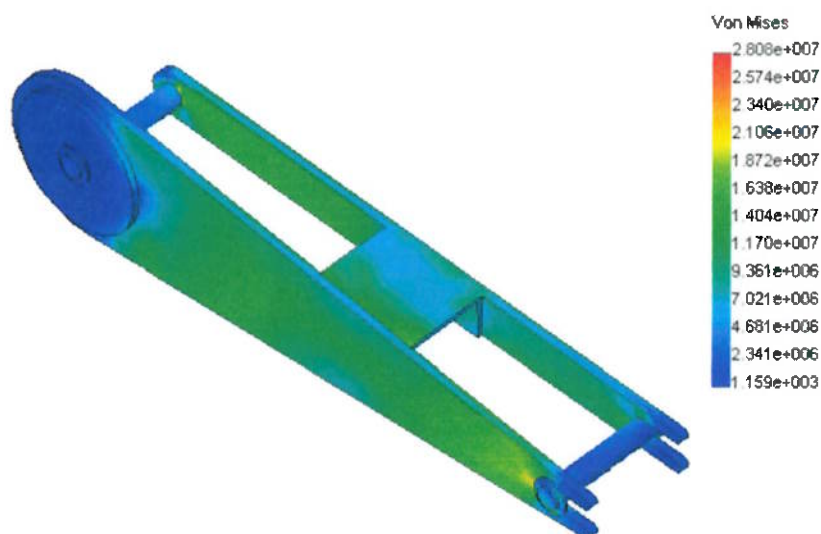


Figura 24: Distribuição da tensão de Von Mises

Braco 50 v3-Deformao - Static Displacement
Units : mm Deformation Scale : 1 : 1

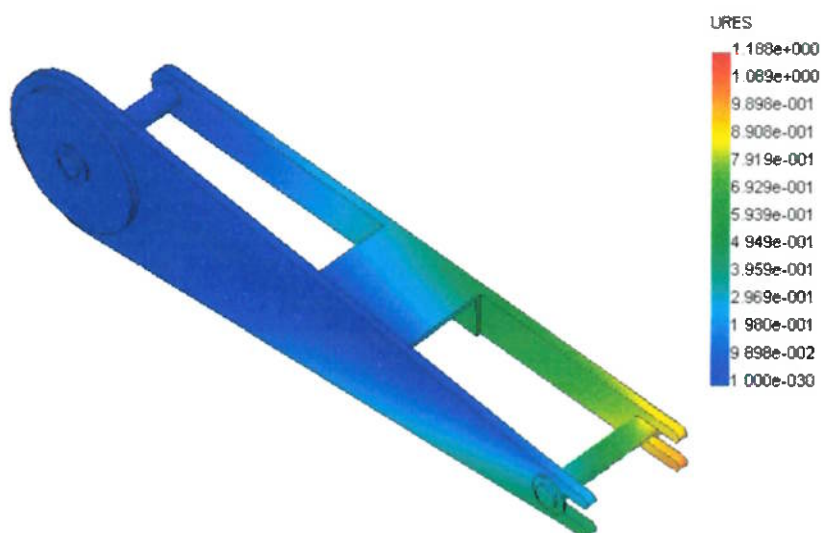


Figura 25: Deflexão resultante

Este modelo foi descartado por apresentar em uma pequena região uma tensão maior que a tensão de escoamento (tem fator de segurança 0,9818).

3.2.2.2. Alternativa 2 – perfil com 60 mm de comprimento



Figura 26: Modelo com perfil em U de 60 mm de comprimento

Braço 60 v3-Deformao : Static Model Stress
Units: N/mm^2 Deformation Scale: 1 : 1

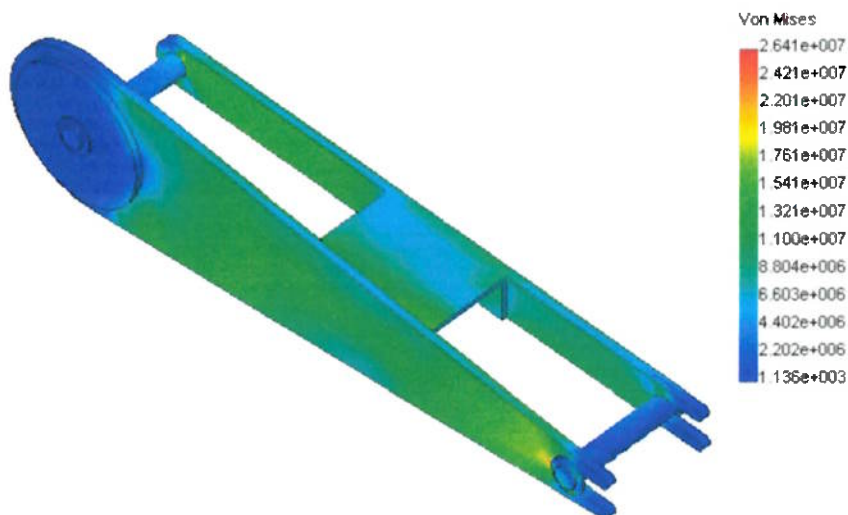


Figura 27: Distribuição da tensão de Von Mises

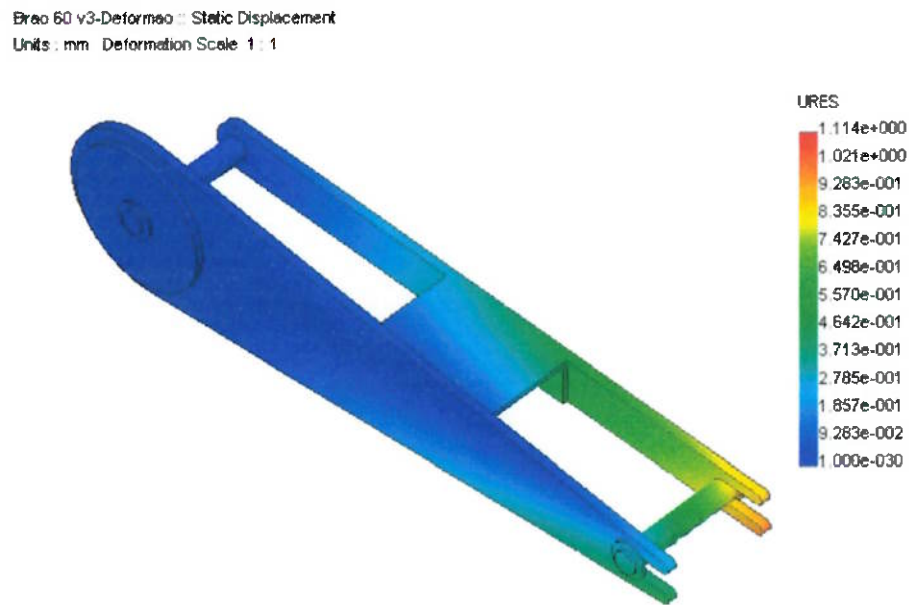


Figura 28: Deflexão resultante

Este segundo modelo apresentou uma pequena melhora em relação ao primeiro, apresentando um fator de segurança 1,044.

3.2.2.3. Alternativa 3 – perfil com 70 mm de comprimento



Figura 29: Modelo com perfil em U de 70 mm

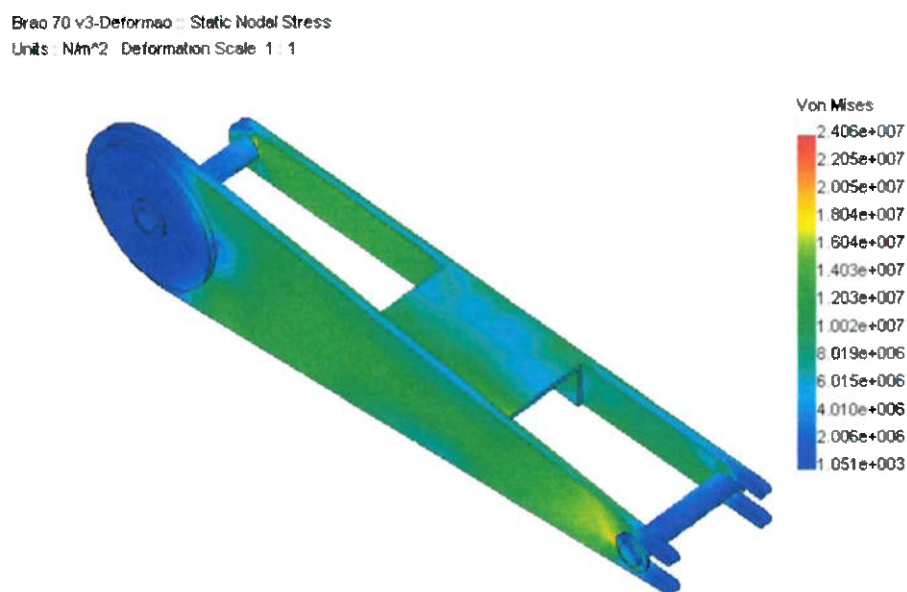


Figura 30: Distribuição da tensão de Von Mises

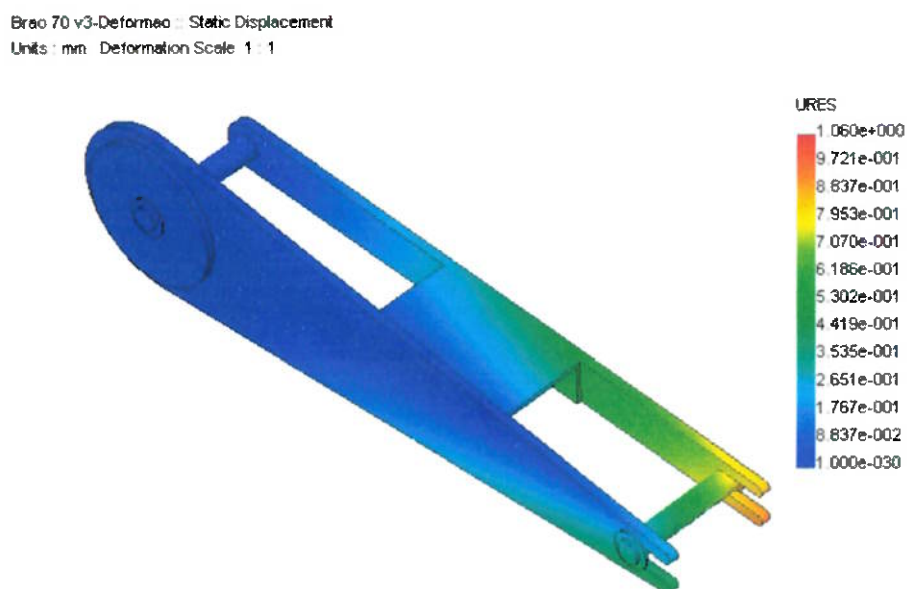


Figura 31: Deflexão resultante

Este terceiro modelo também apresentou apenas uma pequena melhora com relação ao modelo anterior, apresentando um fator de segurança de 1,146 e uma

deflexão máxima de 1,06 mm. Este pequeno fator de segurança é aceitável porque os carregamentos já estão com seus fatores de segurança, então este é a estrutura a ser adotada.

3.3. Mecanismo de Articulação do Braço

3.3.1. Especificação do torque necessário para desvirar o robô

Neste tópico serão apresentados os cálculos para estimar, com boa aproximação, o centro de gravidade do robô, bem com o torque necessário para que o seu braço possa levantá-lo e, conseqüentemente, desvirá-lo.

3.3.1.1. Estimativa da massa e centro de gravidade dos elementos

O primeiro passo para efetuar os cálculos citados anterior é identificar cada elemento na montagem. A Figura 32 irá auxiliar nesta tarefa.

O ponto O na figura representa a origem do sistema de coordenadas adotado na realização dos cálculos. Neste modelo simplificado, é possível admitir que o robô é simétrico em relação ao eixo Y. Portanto tem-se que $X_{CG} = 0$. Entretanto, para obter a coordenada Y do centro de gravidade, precisa-se obter o valor da massa para cada elemento. Bem como a coordenada Y dessa determinada massa. A maioria dos valores apresentada nesta seção foi obtida através de recursos CAD, onde fornecendo a massa específica de cada material, o programa calculava, a partir dos modelos 3D, massa total de cada elemento.

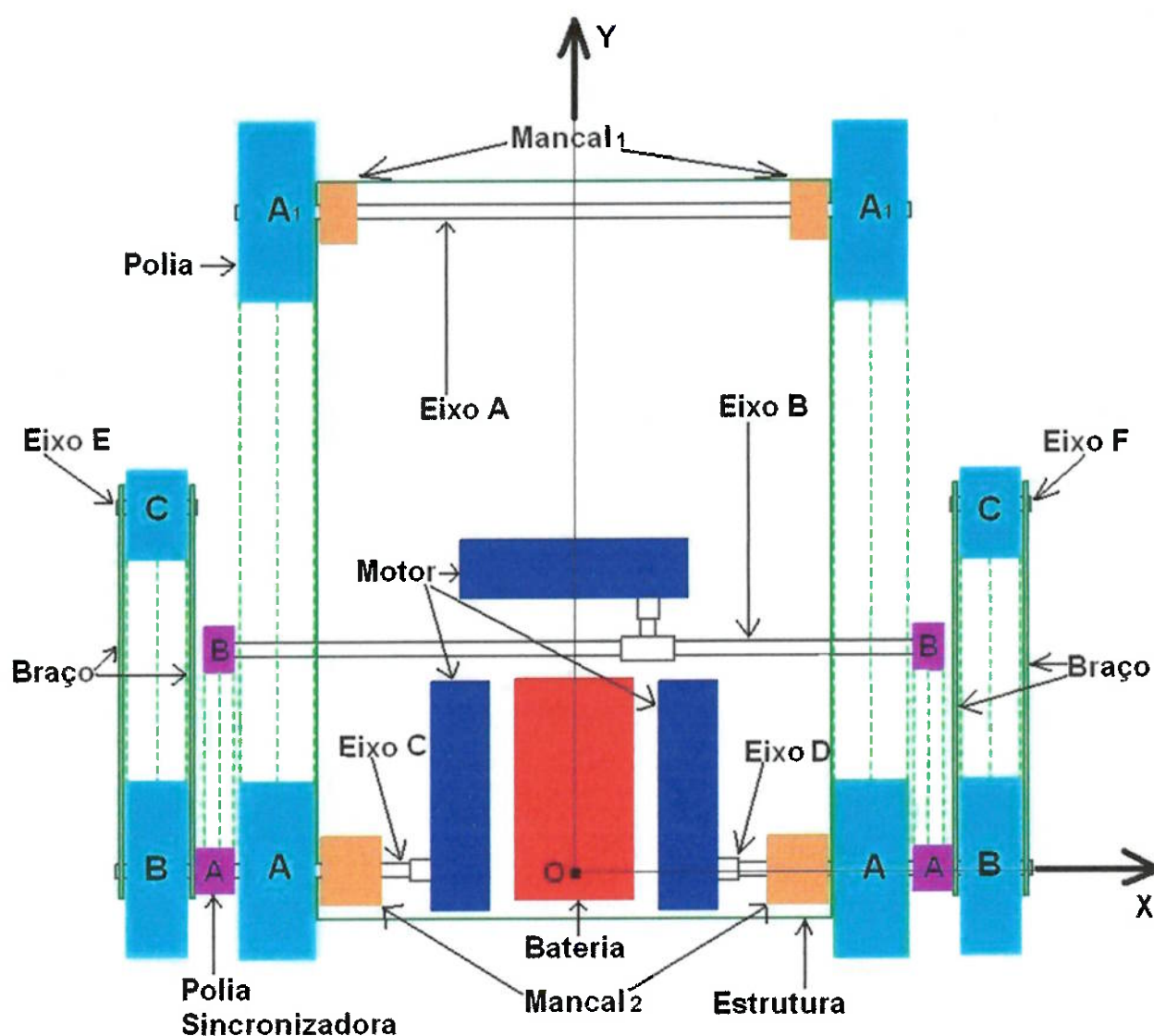


Figura 32: Representação esquemática dos elementos.

1. Polias das esteiras (motoras): parte integrante do sistema movimentação do robô. Elas são feitas em Nylon, cujo massa específica é $\rho = 1,14 \text{ g/cm}^3$. Na figura, os códigos A, A₁, B e C têm como função facilitar a associação entre o desenho e as características de cada polia, apresentadas a seguir:

- Polia A: Raio = 60mm , Largura = 50mm , $m = 0,462 \text{ kg}$ e $Y_{CG} = 0$;
- Polia A₁: Raio = 60mm , Largura = 50mm $m = 0,462 \text{ kg}$ e $Y_{CG} = 500 \text{ mm}$;

- Polia B: $Raio = 60mm$, $Largura = 40mm$ $m = 0,370kg$ e $Y_{CG} = 0$;
- Polia C: $Raio = 30mm$, $Largura = 40mm$ $m = 0,104kg$ e $Y_{CG} = 250mm$.

O valor da massa é referente a apenas uma polia;

2. Motorreductor: de acordo com as especificações fornecidas pelo fabricante, a massa de cada motor é $m = 0,700kg$. Como está representado na figura, existem dois motores mais próximos do eixo X, para estes: $Y_{CG} = 70mm$. O motor restante, mais afastado do eixo X, $Y_{CG} = 200mm$;
3. Bateria: de acordo com as especificações fornecidas pelo fabricante sua massa é $m = 2.500kg$. E, de acordo com o sistema de coordenadas adotado, seu centro de gravidade está em $Y_{CG} = 42mm$;
4. Estrutura: estrutura principal do robô, onde são fixos os motores, a bateria, os suportes para os rolamentos etc. O material utilizado na estrutura é o alumínio, cujo massa específica é $\rho = 2,7g/cm^3$, aproximadamente. Dessa forma tem-se que a massa é $m = 1,300kg$ e o centro gravidade é $Y_{CG} = 245mm$;
5. Braço: este na verdade é um conjunto composto por três peças, todas em alumínio. Lembrando que o robô possui duas dessas estruturas. A massa de cada braço é $m = 0,169kg$ e seu centro gravidade está em $Y_{CG} = 120mm$;
6. Mancal: no robô existem dois modelos de suporte para os rolamentos (ambos em alumínio) dos eixos, diferenciados na figura pelos índices “1” e “2”. A principal diferença entre eles reside no fato de que um suporte (diferenciado pelo índice “2”) acomoda dois rolamentos, enquanto que o outro (índice “1”) apenas um rolamento. Dessa forma, tem se:

- Mancal₁: $m = 0,125kg$ e $Y_{CG} = 500mm$;
- Mancal₂: $m = 0,125kg$ e $Y_{CG} = 0$.

Importante informar que esse valor de massa refere-se ao conjunto (suporte e rolamento);

7. Polia sincronizadora: parte integrante do sistema de movimentação dos braços do robô. Elas são feitas em alumínio e sua massa especificada pelo fabricante. Na figura, os códigos A e B têm como função facilitar a associação entre o desenho e as características de cada polia, apresentadas a seguir:

- Polia A: $m = 0,048kg$ e $Y_{CG} = 0$;
- Polia B: $m = 0,012kg$ e $Y_{CG} = 150mm$.

O valor da massa é referente a apenas uma polia;

8. Eixo: utilizados para transmitir torque e rotação do motor para as polias, são utilizados tanto no sistema de movimentação do robô, quanto no sistema de acionamento do braço. Todos possuem 10mm de diâmetro e são feitos em aço. Na figura, os códigos A, B, C, D, E e F têm como função facilitar a associação entre o desenho e as características de cada polia, apresentadas a seguir:

- Eixo A: $m = 0,255kg$ e $Y_{CG} = 500mm$;
- Eixo B: $m = 0,306kg$ e $Y_{CG} = 150mm$;
- Eixo C: $m = 0,175kg$ e $Y_{CG} = 0$;
- Eixo D: $m = 0,175kg$ e $Y_{CG} = 0$;
- Eixo E: $m = 0,034kg$ e $Y_{CG} = 250mm$;
- Eixo F: $m = 0,034kg$ e $Y_{CG} = 250mm$;

9. Outros elementos: para deixar mais próximo da realidade o valor da massa do robô, é preciso acrescentar mais algumas massas nesse cálculo. Dentro esses pode-se contar a massa das esteiras, no caso, $m = 1,000kg$ e $Y_{CG} = 200mm$. Outro fator que influencia nesse cálculo são os elementos de fixação, tais como parafusos e rebites, para estes a estimativa é de massa $m = 0,250kg$, como estes podem ser encontrados distribuídos por toda a estrutura, principalmente na porção dianteira (na faixa entre zero e 200 do eixo X do sistema de coordenadas adotado) pode-se considerar $Y_{CG} = 100mm$.

3.3.1.2. Estimativa da massa e do centro de gravidade do robô

Nesta etapa o cálculo da massa total estimada do conjunto todo se torna muito simples. Bastando somar o valor da massa de cada elemento da montagem. Portanto massa total do robô é $m_{robô} = 10,960kg$. Como fora dito, este é apenas uma estimativa do valor real. Uma vez que, a massa de alguns elementos foi desprezada (parafusos, porcas, anéis elásticos etc, são alguns exemplos de peças cuja massa foi desprezada). Entretanto pode se dizer que essa estimativa está muito próxima do valor real.

Para obter o centro de gravidade (aproximado) é preciso fazer uma média ponderada entre a massa de cada elemento e seu respectivo centro de gravidade. De acordo com a equação a seguir:

$$Y_{CG} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \cdot Y_i}{\sum_{i=1}^n m_i}$$

Efetuada o cálculo, o resultado obtido foi $Y_{CG} = 161mm$, da origem do sistema de coordenadas adotado.

3.3.1.3. Estimativa do torque necessário para desvirar o robô

Para este cálculo é importante adotar algumas hipóteses:

1. Para ser possível desvirar o robô, em primeiro lugar, é preciso que seu centro de gravidade esteja na região entre as polias motoras de seus braços. Caso esta condição não seja satisfeita, no momento que o braço iniciar o movimento para levantar o robô, como a força peso está sendo aplicada fora da área de atuação do braço, o robô acaba tombando para trás. A figura a seguir procura ilustrar as duas situações. Entretanto, como fora visto no tópico anterior, o centro de gravidade do carrinho está em $X_{CG} = 0$ e $Y_{CG} = 161mm$, uma vez que a distância entre as polias do braço é 250mm, este se encontra dentro da faixa necessária, portanto esta condição está atendida;

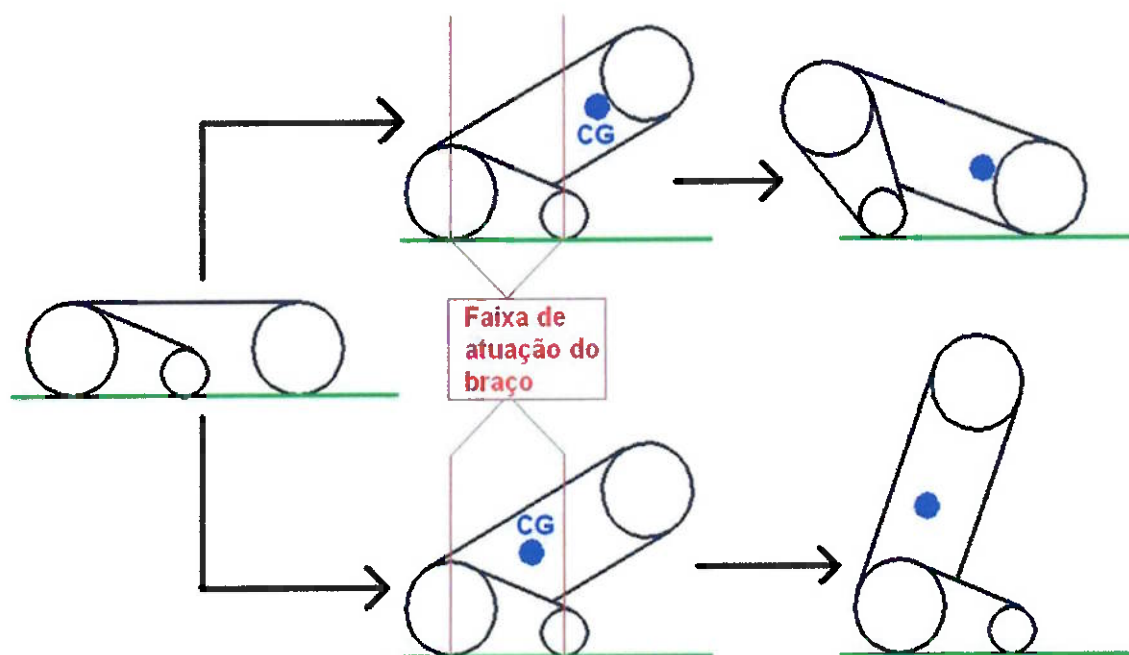


Figura 33: Robô desvirando com seu CG dentro, e fora, da faixa de atuação do braço.

2. O torque necessário é dado pela equação:

$$Torque = \left(\sum_{i=1}^n m_i \cdot Y_i \right) \cdot g$$

Onde: Y: braço de aplicação da força;

m: massa do elemento;

g: gravidade ($g = 9,8m/s^2$).

Neste caso, não são incluídos todos os pesos, uma vez que, por exemplo, o peso da estrutura do braço não influencia o torque necessário para desvirar o corpo do robô.

Elementos com centro de gravidade sobre o eixo X, isto é, $Y_{CG} = 0$, também são desconsiderados, pois, neste caso, o braço da força é zero.

Após verificar as duas hipóteses anteriores, realizou-se o cálculo, chegando ao seguinte resultado: $Torque = 14,96Nm$. Este valor corresponde ao torque que deve ser fornecido ao braço do robô, para que o mesmo seja capaz de levantar o restante da estrutura. Entretanto, este valor diminui ao longo da ação, uma vez que, quanto maior o ângulo entre o robô o solo, menor é o braço da força (distância horizontal entre o eixo de rotação e a direção de aplicação da força peso do CG diminui). Portanto, somente é requerido este torque no momento inicial do movimento.

3.3.2. Alternativas de solução

Um dos problemas enfrentados por nossa equipe foi o de como seria realizado o movimento de rotação do braço do robô, uma vez que também existe a necessidade da esteira estar funcionando.

Sendo assim o seguinte problema deve ser solucionado: como permitir ambos os movimentos (rotação do braço e funcionamento da esteira). Tendo em vista a disposição dos elementos, a única saída é transmitir dois torques diferentes pelo mesmo eixo. Visando solucionar tal problema, foram propostas três alternativas, as

quais estão apresentadas de forma resumida. Com o auxílio de uma tabela de decisões, foi escolhida a que melhor se adequou às restrições anteriormente expostas.

3.3.2.1. Alternativa 1

A idéia desta alternativa é projetar um mecanismo cujo funcionamento seja semelhante ao de uma embreagem de automóvel, isto é, a proposta é construir um mecanismo que, através de um atuador, acoplasse e desacoplasse, permitindo os dois movimentos (o da esteira e o do braço). Este mecanismo é composto por duas placas com diversos pinos e uma chapa com furos, na mesma quantidade que dos pinos. A quantidade de pinos determina as possíveis posições (ângulos) que o braço pode assumir. O sistema funciona da seguinte forma, um atuador é responsável por movimentar a primeira placa com pinos, ela possui apenas um grau de liberdade e, portanto movimenta-se apenas em um eixo.

No braço do robô está a placa com os furos e na polia da esteira a outra placa com os pinos. Quando a primeira placa com pinos está na posição inicial, acoplada ao braço, o braço do robô encontra-se travado (impossibilitado de rotacionar). Como a polia é fixa ao eixo ela continua girando (o braço gira independentemente do eixo) e, conseqüentemente a esteira também. A figura abaixo mostra a posição inicial do mecanismo.

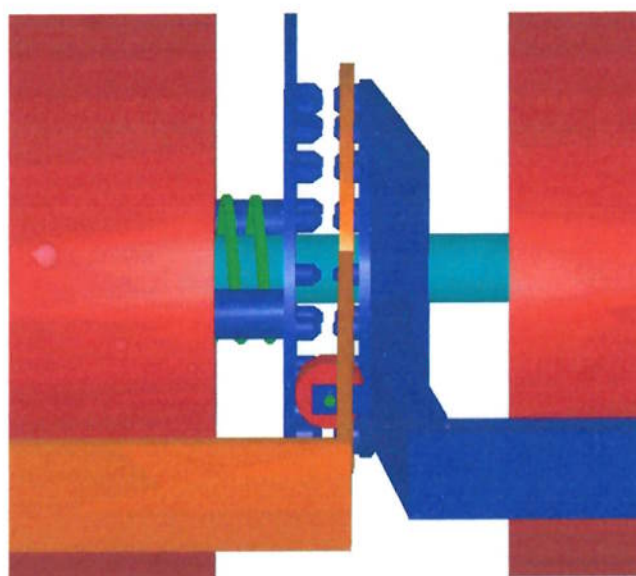


Figura 34: Mecanismo de transmissão de movimento ao braço (alternativa 1)

Como se pode observar, uma roda, fixa à placa com pinos, garante que a outra placa (da polia) mantenha-se desacoplada da chapa perfurada.

Quando for necessária a rotação do braço, o atuador recolhe a placa ligada a ele. A mola, localizada entre a polia e a outra placa com pinos, inicialmente comprimida, agora empurra a placa contra a chapa perfurada. Dessa forma o braço acopla-se à polia da esteira. Como esta gira de acordo com o movimento do eixo, o braço passa a se movimentar também, seguindo a rotação o eixo. Com o final do posicionamento do braço o atuador novamente movimenta a placa com pinos, empurrando a outra placa (e comprimindo a mola) e soltando o braço, que fica travado na posição em que se encontrava.

A seguir são apresentadas mais figuras da solução 1 (vistas em corte).

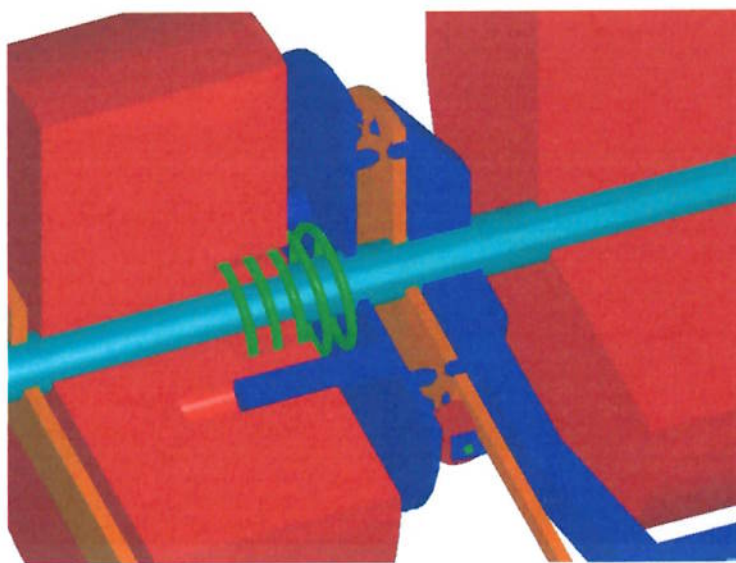


Figura 35: Vista em corte da alternativa 1

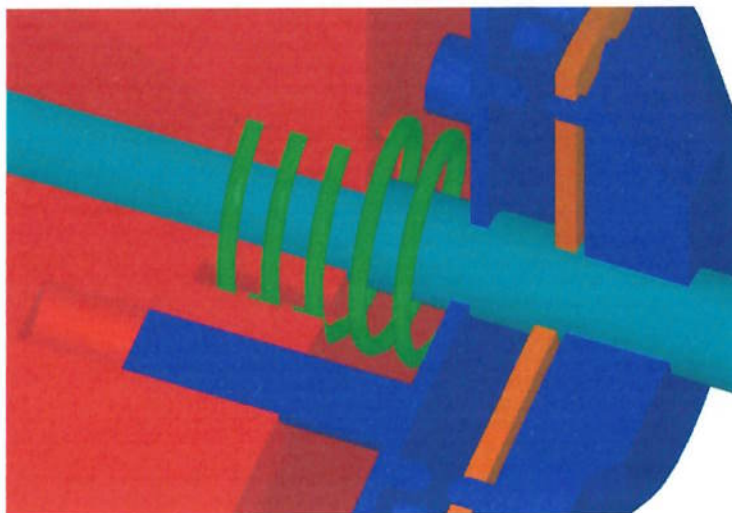


Figura 36: Vista em corte da alternativa 1

Analisando as vantagens e desvantagens desta solução, pode-se dizer que como principal ponto favorável tem-se a não necessidade de um motor extra para movimentar o eixo, e sim de um atuador linear (por exemplo, do tipo solenóide), o qual é mais simples de ser controlado.

Como pontos desfavoráveis, pode se citar a grande dificuldade de fabricação das peças, associada a precisão no alinhamento dos elementos (um desalinhamento pode acarretar no travamento do mecanismo).

Outro problema apresentado é a impossibilidade de rotacionar o braço com o robô parado, uma vez que ele sempre precisará estar em movimento para realizar tal tarefa. Outra falha é que, depois que o braço realizou seu movimento e deseja-se realizar seu travamento, os pinos podem não estar alinhados com os furos da chapa, o que faz com que seja necessária uma pequena rotação do eixo para o alinhamento. Essa pequena rotação leva a um pequeno deslocamento do robô, o que pode ser um inconveniente.

3.3.2.2. Alternativa 2

A segunda alternativa de solução sugere um mecanismo totalmente diferente do apresentado na alternativa 1. A proposta neste caso é utilizar dois eixos concêntricos, um responsável pela movimentação do braço e o outro pela rotação da polia e

conseqüente movimentação da esteira. Para esta solução, temos novamente o eixo motriz fixo à polia, garantindo a movimentação da esteira. O outro eixo é fixo no próprio braço do robô. Este segundo eixo é na verdade um flange, que é parafusada no braço, como se pode observar na figura a seguir.

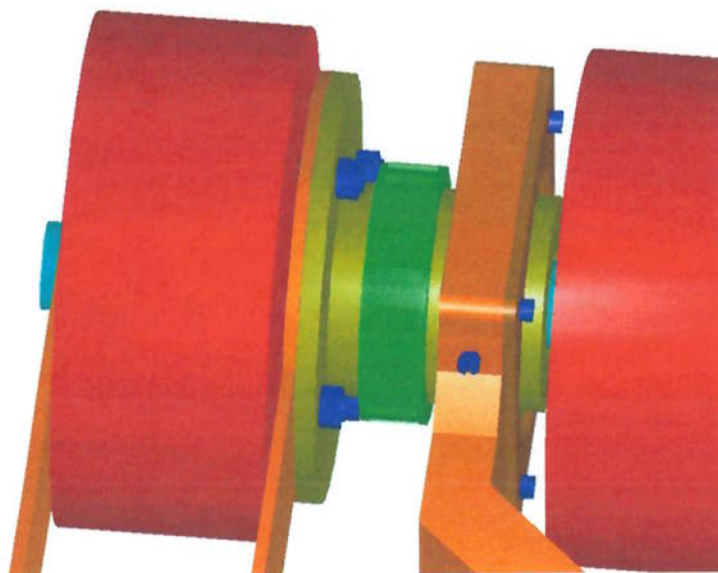


Figura 37: Mecanismo de transmissão de movimento ao braço (alternativa 2 de solução)

Para a rotação do braço utiliza-se uma polia sincronizadora, a qual é movimentada por um outro motor, independente do motor do eixo principal. Como a correia é acoplada a um motor de passo, o braço pode ser posicionado em inúmeras posições (muito mais posições que na solução anterior).

Devido à correia estar tracionada e o flange possuir um comprimento considerável (uma vez que a distância entre as duas polias das esteiras devem estar o mais próximas possíveis), acrescentou-se um suporte, fixo diretamente no corpo do robô, cuja função é equilibrar a força originada pela correia, diminuindo os esforços sobre o eixo principal. Mas para não impedir a rotação o braço, a conexão entre o suporte e o flange é feita por um rolamento. A seguir são apresentadas figuras com maiores detalhes desta solução.

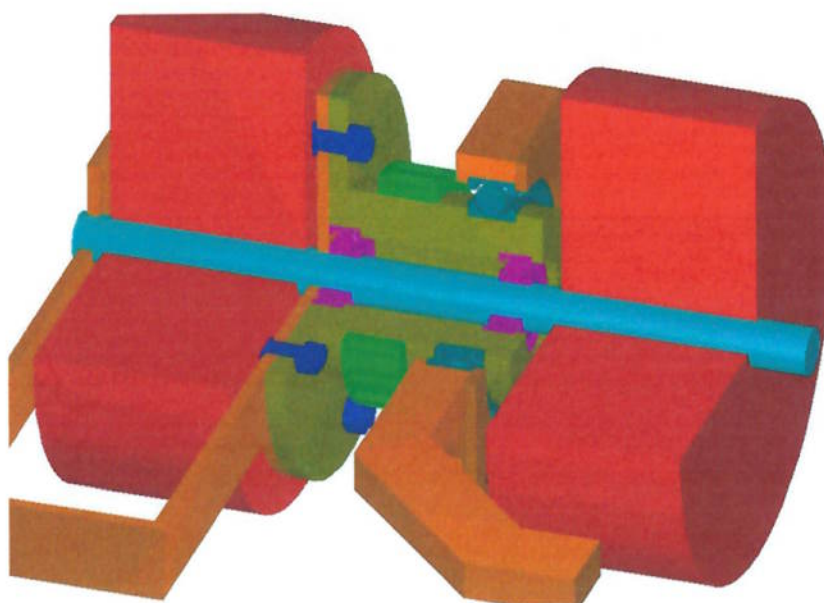


Figura 38: Vista em corte da alternativa 2 de solução.

Com o auxílio da vista em corte da solução, nota-se a existência de mais dois rolamentos, internos ao flange. Eles têm como função ajudar a garantir a concentricidade entre o eixo principal e a flange. A seguir uma figura ampliada do mecanismo da alternativa 2.



Figura 39: Vista em corte da alternativa 2 de solução

O principal ponto favorável desta alternativa é a maior facilidade de fabricação das peças, em comparação com a alternativa 1. Uma vez que as peças mais

complexas, rolamentos e polia sincronizadora, estão disponíveis no mercado para a compra. Também pode ser citado como vantagem a maior gama de posições possíveis para o braço.

Já a maior desvantagem deste sistema vem do fato do flange possuir um comprimento relativamente grande. Isto por que tanto a polia sincronizadora, quanto o rolamento do suporte devem ser presos ao flange. Mais um espaço extra para os parafusos que fixam o flange ao braço, afinal, caso estes fiquem muito próximos da polia sincronizadora existe a possibilidade deles causarem algum tipo de interferência na mesma.

3.3.2.3. Alternativa 3

Esta alternativa não apresenta um mecanismo totalmente diferente das outras duas soluções, mas sim uma forma otimizada para a segunda alternativa de solução. A movimentação do braço continua a mesma, através da correia sincronizadora ligada a um motor de passo. A principal alteração em relação ao mecanismo original foi a retirada do flange. Com esta simples ação, a solução tornou-se mais simples e significativamente mais compacta axialmente, resultando na diminuição considerável da distância entre as polias das esteiras. A seguir são apresentadas figuras da solução.

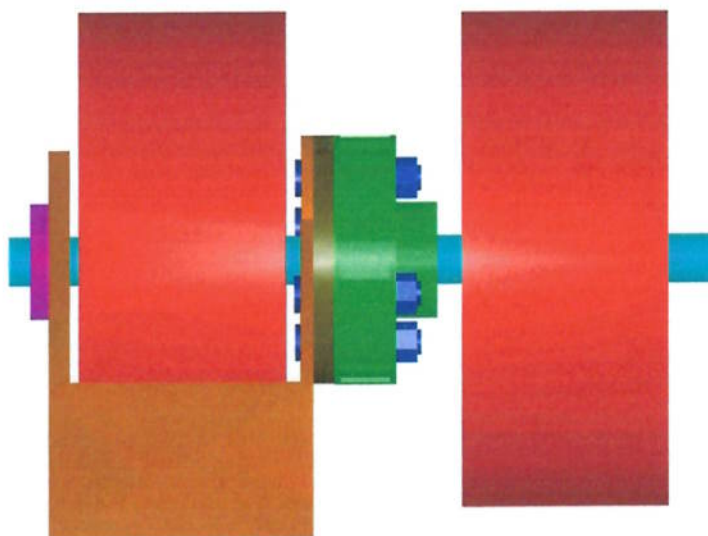


Figura 40: Mecanismo de transmissão de movimento ao braço (alternativa 3 de solução).

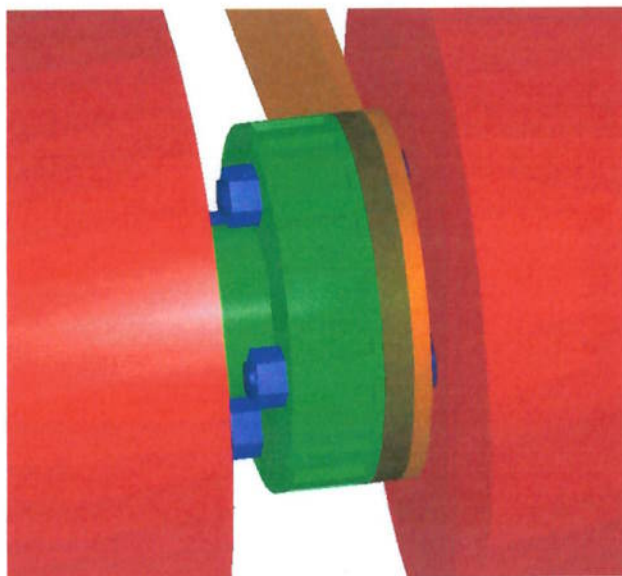


Figura 41: Mecanismo de transmissão de movimento ao braço (alternativa 3 de solução).

Com a retirada do flange a polia sincronizadora passa a ser fixada (por meio de parafusos) no braço do robô. O separador entre a polia sincronizadora e o braço tem como função evitar possíveis interferências entre a correia e a estrutura do braço.

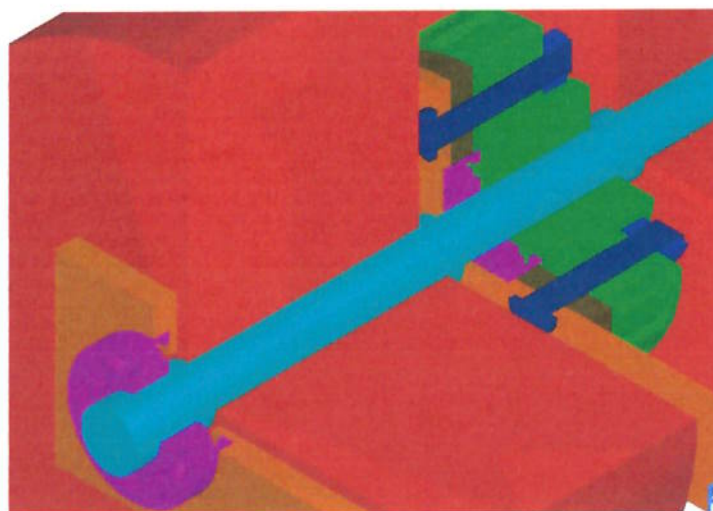


Figura 42: Vista em corte da alternativa 3 de solução.

Nesta solução, em vez de utilizar três rolamentos para o mecanismo, é possível utilizar apenas um interno à polia sincronizadora.

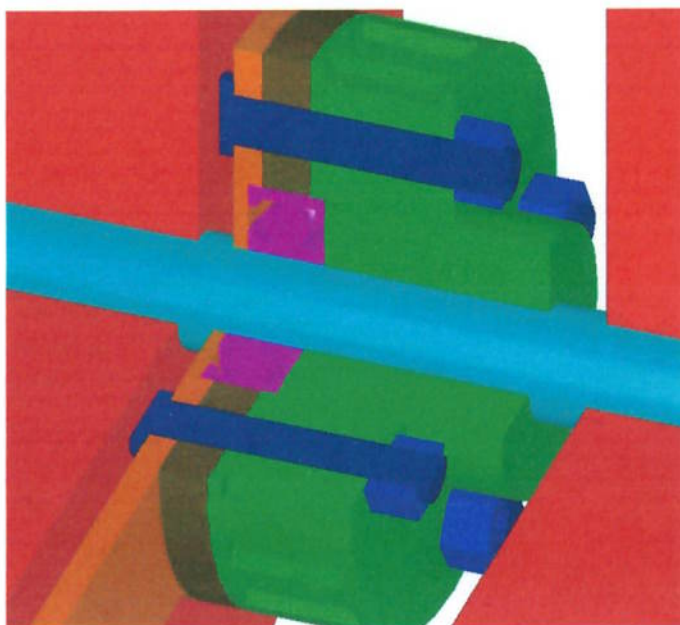


Figura 43: Vista em corte da alternativa 3 de solução.

Esta solução além de ser a mais simples de todas (menor quantidade de peças, fácil montagem) ainda é a mais compacta também.

3.3.3. Escolha da solução

Para avaliar qual das três alternativas de solução apresentadas anteriormente é a mais adequada aos requisitos do projeto, foi criada uma tabela de decisões. Nesta tabela, notas foram dadas para os parâmetros considerados mais relevantes pelo grupo. A cada nota (que varia entre zero e dez) é aplicado um fator multiplicativo, chamado peso, que reflete o quão importante é a consideração de um determinado fator para a escolha. Estes pesos podem variar de um a cinco. Os parâmetros (e seus respectivos pesos) são os seguintes:

- Custos de fabricação: uma das diretrizes do projeto é a contenção de gastos, dado o limitado montante de recursos disponíveis. Aqui são contabilizados os preços de materiais para a fabricação de algumas peças, peças prontas (como rolamentos) e gastos diversos. Assim este parâmetro de decisão tem um enorme peso na escolha da solução, portanto peso cinco. As maiores notas

neste quesito significam projetos menos dispendiosos em termos de recursos financeiros;

- **Fabricação de peças:** outro fator muito importante, neste caso é avaliação da dificuldade de se fabricar (ou mesmo comprar pronta) uma determinada peça. Neste tópico são consideradas todas as possíveis dificuldades que podem ser encontradas durante o processo de fabricação, como, por exemplo, a dificuldade em se garantir na peças as tolerâncias requeridas no projeto, ou mesmo a possibilidade de fabricação da peça, devido às limitações das próprias máquinas ferramentas disponíveis. Dessa forma, as alternativas que possuírem em seu projeto elementos mais fáceis de fabricar e/ou comprar terão uma maior consideração no momento da tomada de decisão. Sendo assim, o peso deste parâmetro é cinco e as maiores notas indicam projetos de execução mais simples;
- **Dimensões externas:** outra preocupação do projeto é reduzir ao máximo a distância entre as polias da esteira, isto é, a solução deve ser a mais compacta (e eficiente) possível. Isto se faz necessário por dois motivos principais: economia de material e redução de esforços. Por exemplo, um eixo menor implica em menos material necessário e maior rigidez do mesmo. Como o eixo das polias é externo ao corpo do robô, este fica em balanço, dessa forma é necessário diminuir seu comprimento para, conseqüentemente, diminuir o braço aplicado, reduzindo, portanto, o momento fletor aplicado no mesmo. Como se pode notar este parâmetro também exerce grande influência na escolha da alternativa de solução, sendo assim, peso quatro. Aqui, maiores notas significam soluções mais compactas (axialmente);
- **Posicionamento do braço:** uma maneira de garantir uma maior versatilidade do robô é permitir que o braço possa ser posicionado no maior número possível de posições, garantindo uma maior faixa de ângulos de ataque (ângulo com o qual o braço do robô atinge o degrau para iniciar a sua subida). Este parâmetro é importante, entretanto não é fundamental, uma vez que o robô é especificado para subir escadas padronizadas, por isso seu peso é um e as maiores notas implicam em menor $\Delta\theta$ alcançado (o que possibilitaria subir diversos tipos de escadas e não só as especificadas).

- **Manutenção:** traduz a dificuldade encontrada numa possível manutenção do sistema. Como a dificuldade para repor uma peça danificada, se, por exemplo, para substituir um determinado elemento é preciso desmontar todo o mecanismo e se isso é fácil (ou não) de se fazer. Aqui também está incluída a manutenção preventiva, como a lubrificação das partes. Como a manutenção é algo imprescindível para o bom funcionamento (e durabilidade) da solução, o peso adotado foi três, onde as maiores notas demonstram uma manutenção mais fácil de se realizar;
- **Montagem do sistema:** este parâmetro procura mostrar as dificuldades que podem ser encontradas no momento da montagem do conjunto. Como a dificuldade para garantir o alinhamento entre as peças, principalmente com relação ao eixo. Para esta variável atribui-se o peso dois e as maiores notas implicam em montagens mais simples;
- **Complexidade:** exprime a quantidade de peças necessárias para o perfeito funcionamento do sistema. Um menor número de elementos pode significar um mecanismo mais simples e compacto (entretanto isto pode não ser verdade em alguns casos). Menos peças podem também significar menor tempo gasto com usinagem, ou mesmo menos gastos com a compra de peças. Como esta variável não é fundamental à escolha da solução, seu peso é um, e maiores notas implicam em mecanismos com um menor número de elementos.

Após uma rápida apresentação dos parâmetros de avaliação, agora é apresentada a tabela de decisões, na qual para cada alternativa existem duas colunas, a primeira com a nota dada e a segunda com o valor da nota depois de aplicado o peso do parâmetro analisado.

Tabela 2: Tabela de decisões.

		Alternativa 1		Alternativa 2		Alternativa 3	
Parâmetro	Peso	Nota	Final	Nota	Final	Nota	Final
Custos de fabricação	5	8	40	8	40	9	45
Fabricação de peças	5	4	20	7	35	7	35
Dimensões externas	4	6	24	3	12	9	36
Manutenção	3	8	24	6	18	8	24
Montagem do Sistema	2	6	12	6	12	8	16
Complexidade	1	5	5	7	7	9	9
Posicionamento do braço	1	2	2	10	10	10	10
Pontuação final			127		134		175

A partir da tabela de decisões pode-se concluir que a alternativa que melhor atende aos parâmetros do projeto da transmissão de movimento ao braço do robô é a alternativa 3.

3.3.4. Detalhamento da solução escolhida

Agora são apresentadas algumas características da alternativa 3 de solução, tais como dimensões e outras especificações das peças a serem utilizadas nesta solução. A seguir é apresentada uma figura com a identificação de cada elemento do mecanismo, bem como de outras peças que interagem com o sistema de transmissão de movimento do braço.

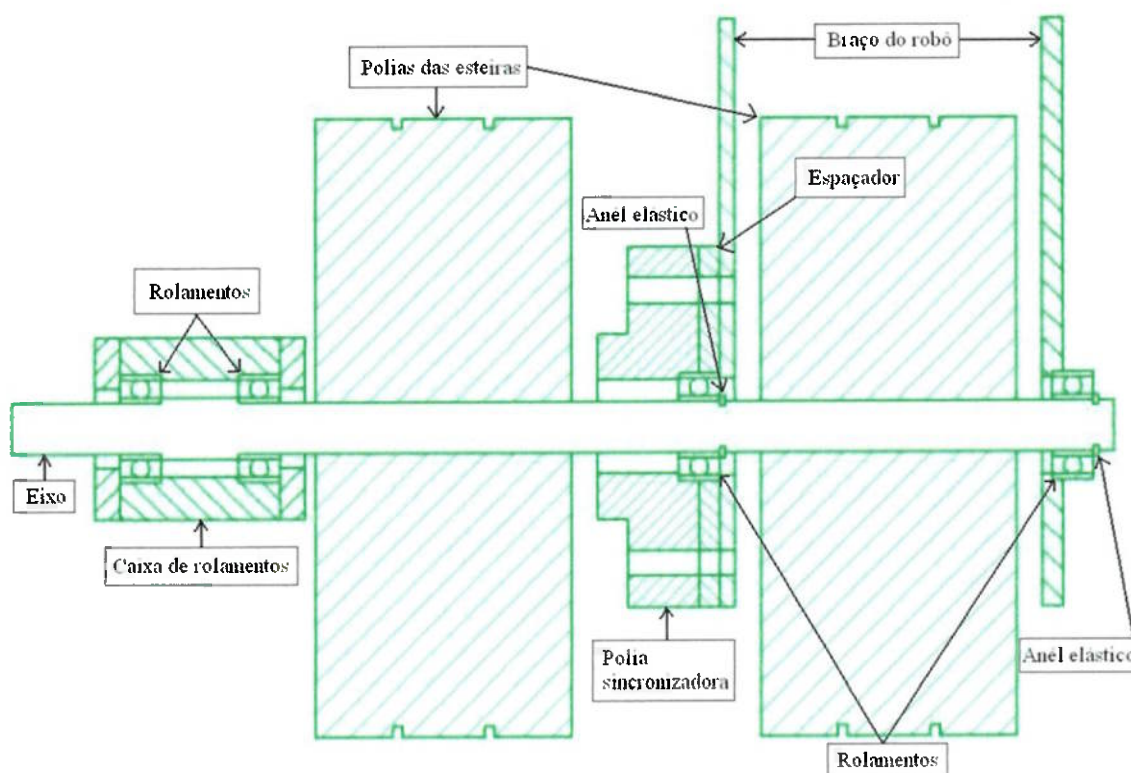


Figura 44: Imagem 2D da solução escolhida (alternativa 3).

Como elementos integrantes da solução pode-se incluir rolamento, anel elástico, polia sincronizadora e espaçador. Estas são as peças a serem detalhadas:

- Rolamento: localizado interno à polia sincronizadora. Ele é blindado, pois, dessa maneira o lubrificante fica confinado, não existindo a necessidade de lubrificação futura. Esta escolha se deve ao fato de que as polias das esteiras devem ser mantidas longe de qualquer tipo de lubrificante (quanto mais atrito entre a polia e a borracha da esteira, melhor). Suas dimensões principais são: diâmetro externo 28 mm, diâmetro interno 12 mm e largura da pista 8 mm;
- Anel elástico: usado para evitar que o rolamento se desloque. Como os esforços axiais são praticamente desprezíveis, optou-se por utilizar anéis elásticos ao invés de usinar ressalto no eixo. Suas principais especificações: anel para eixos com 12 mm de diâmetro e com ranhura para anel elástico, espessura 1,1 mm;

- Polia sincronizadora: responsável pela rotação do braço do robô. Especificações: 38 dentes, diâmetro externo 60,47 mm;
- Espaçador: usado para evitar interferências entre a correia sincronizadora e o braço do robô. Feita de Nylon, mesmo material da polia da esteira. Principais dimensões: diâmetro 75 mm, espessura 5mm;
- Parafusos: responsável pela fixação da polia sincronizadora no braço do robô.

Na sequência, tem-se o modelo CAD da solução escolhida:

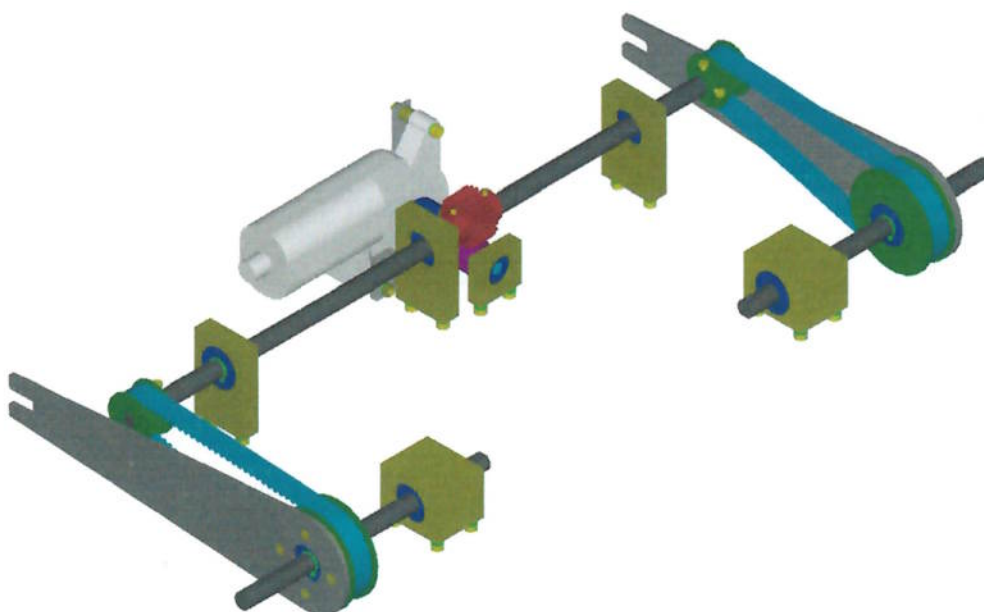


Figura 45: Mecanismo de articulação do braço

Em detalhe, o mecanismo desenvolvido para transferir potência ao braço.

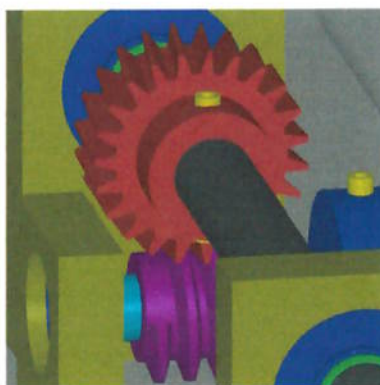


Figura 46: Par sem fim

3.3.4.1. Seleção das polias e correias sincronizadoras

Para a seleção dos elementos de transmissão adequados, deve-se conhecer:

- Torque a ser transmitido;
- Potência transmitida;
- Condições de operação do equipamento.

No caso do braço articulado do robô em questão, a transmissão do movimento será efetuada utilizando-se polias e correias sincronizadoras.

A projeto prevê a utilização de duas polias movidas acopladas diretamente ao braço do robô, bem como duas polias motoras menores (a relação de transmissão é 2:1) acopladas a um eixo ao qual será fornecido torque. Tendo em vista que a rotação desejável para o braço é da ordem de 4 rpm, bem como o torque necessário para realizar a virada do robô (elevação do seu centro de gravidade) em torno do eixo dianteiro é da ordem de 18 N.m, com um fator de segurança 1,2. Sendo que este torque total, dada a configuração do equipamento, está sendo aplicado a duas polias sincronizadoras, conclui-se que cada polia deve aplicar 9 N.m.

Assim, precedemos ao dimensionamento dos elementos a serem utilizados, segundo o procedimento recomendado por um fabricante de correias (GATES), que inclui as seguintes etapas:

- a) Cálculo da potência de trabalho
- b) Seleção do passo da correia
- c) Seleção da largura da correia

a) Cálculo da potência de trabalho

Para o cálculo da potência de trabalho, devemos utilizar a seguinte formulação:

$$DP = P \times SF$$

onde:

DP = potência projetada

P = potência utilizada

SF = fator de serviço

O fator de serviço para a aplicação em questão foi obtido de tabelas fornecidas pelo fabricante, onde se leva em conta que o acionamento é feito por motor DC, o acionamento é intermitente e o tipo de aplicação, o que nos forneceu $FS = 1,3$.

Logo: $DP = P \cdot SF = \omega \cdot T \cdot 1,3 \Rightarrow DP = 9,8W$

b) Seleção do passo da correia

A seleção do passo da correia é feita com base na tabela abaixo:

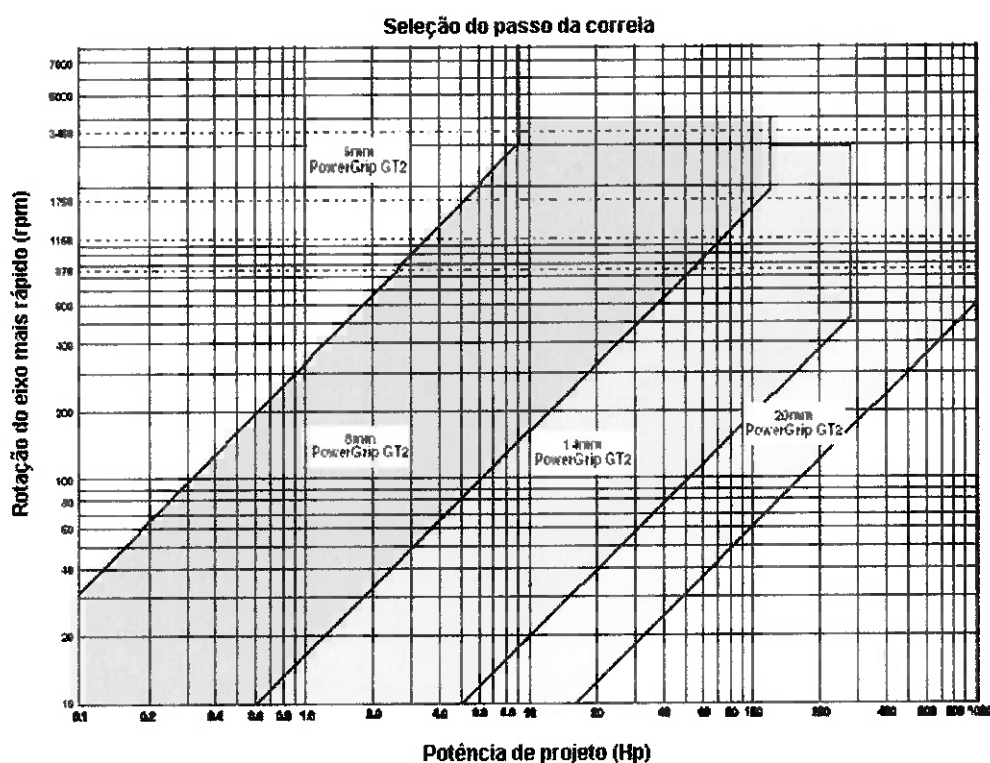


Figura 47: Tabela de seleção de passo para correias

Para a aplicação em questão, onde a rotação é extremamente baixa, não é muito claro qual passo utilizar. Interpolando-se a curva, recai-se sobre a utilização da correia com passo 5 mm ou 8 mm. Considerando o requisito de redução de massa do equipamento, bem como restrições de tamanho de algumas peças, optou-se por utilizar as polias e correias com passo 5 mm, dado que as mesmas apresentam menores dimensões.

c) Seleção da largura da correia

A seleção da largura da correia é feita com base nos seguintes fatores:

- Relação de transmissão (2:1)
- Distância entre centros desejada (150 mm)

Definida a relação de transmissão, utilizando a tabela seguinte, determina-se os pares de polias adequados para a distância entre eixos desejada.

Tabela 3: Distâncias entre centros

Sprocket Combinations				Speed Ratio	Center Distance, Inches											
DriveR		DriveN			SUR-300 P.L. 11.81 60 teeth	SUR-355 P.L. 13.06 71 teeth	SUR-375 P.L. 14.34 75 teeth	SUR-440 P.L. 15.74 80 teeth	SUR-465 P.L. 15.95 81 teeth	SUR-425 P.L. 16.72 85 teeth	SUR-450 P.L. 17.76 90 teeth	SUR-480 P.L. 18.85 90 teeth	SUR-535 P.L. 21.03 107 teeth	SUR-565 P.L. 22.84 112 teeth	SUR-580 P.L. 22.85 115 teeth	SUR-640 P.L. 23.62 120 teeth
No. of Grooves	Pitch Diameter (inches)	No. of Grooves	Pitch Diameter (inches)													
32	2.005	60	3.760	1.875				3.23	3.33	3.73	4.24	5.24	5.94	6.53	6.83	7.23
48	3.008	90	5.639	1.875												4.84
34	2.130	64	4.010	1.882						3.41	3.92	4.93	5.63	6.23	6.52	6.92
18	1.128	34	2.130	1.889	3.31	4.40	4.70	5.20	5.30	5.78	6.28	7.26	7.96	8.55	8.84	9.24
36	2.256	68	4.261	1.889							3.60	4.61	5.32	5.92	6.22	6.62
19	1.191	36	2.256	1.895	3.15	4.25	4.64	5.14	5.24	5.63	6.13	7.11	7.80	8.40	8.69	9.09
38	2.381	72	4.511	1.895								4.29	5.00	5.61	5.91	6.31
20	1.253	38	2.381	1.900	3.00	4.10	4.49	4.99	5.08	5.48	5.98	6.96	7.66	8.25	8.54	8.94
21	1.316	40	2.506	1.905	2.84	3.94	4.34	4.84	4.93	5.33	5.83	6.81	7.50	8.10	8.39	8.79
23	1.441	44	2.757	1.913	2.52	3.63	4.03	4.53	4.63	5.02	5.52	6.51	7.20	7.80	8.09	8.49
25	1.566	48	3.008	1.920		3.32	3.72	4.22	4.32	4.72	5.22	6.21	6.90	7.49	7.79	8.19
26	1.629	50	3.133	1.923		3.16	3.56	4.07	4.16	4.56	5.06	6.05	6.75	7.34	7.64	8.03
23	1.441	45	2.820	1.957	2.46	3.58	3.97	4.48	4.57	4.97	5.47	6.46	7.15	7.74	8.04	8.44
18	1.128	36	2.256	2.000	3.20	4.30	4.69	5.19	5.28	5.68	6.18	7.16	7.85	8.44	8.74	9.13
19	1.191	38	2.381	2.000	3.04	4.14	4.54	5.03	5.13	5.53	6.03	7.01	7.70	8.29	8.59	8.98
20	1.253	40	2.506	2.000	2.88	3.99	4.38	4.88	4.98	5.38	5.87	6.86	7.55	8.14	8.44	8.84
22	1.379	44	2.757	2.000	2.56	3.68	4.07	4.57	4.67	5.07	5.57	6.56	7.25	7.84	8.14	8.53
24	1.504	48	3.008	2.000		3.36	3.76	4.26	4.36	4.76	5.26	6.25	6.95	7.54	7.84	8.23
25	1.566	50	3.133	2.000		3.20	3.60	4.11	4.21	4.61	5.11	6.10	6.79	7.39	7.68	8.08
26	1.629	52	3.258	2.000		3.04	3.45	3.95	4.05	4.45	4.95	5.95	6.64	7.24	7.53	7.93
28	1.754	56	3.509	2.000			3.12	3.64	3.73	4.14	4.64	5.64	6.34	6.93	7.23	7.63
30	1.880	60	3.760	2.000				3.31	3.41	3.82	4.33	5.33	6.03	6.62	6.92	7.32
32	2.005	64	4.010	2.000						3.50	4.01	5.02	5.72	6.32	6.61	7.01
34	2.130	68	4.261	2.000							3.69	4.70	5.41	6.01	6.31	6.71
36	2.256	72	4.511	2.000								4.38	5.09	5.69	5.99	6.40
40	2.506	80	5.013	2.000									4.45	5.06	5.36	5.77
45	2.820	90	5.639	2.000											4.55	4.96
56	3.509	112	7.018	2.000												

Neste caso, o par escolhido possui 19 e 38 dentes, com uma correia de 90 dentes.

Para a determinação das dimensões da polia foram impostas algumas restrições:

- a) Diâmetro primitivo máximo: 80 mm.

Justificativa: O diâmetro da polia que move a esteira é 120 mm e, portanto a polia maior deve possuir diâmetro externo menor que 120 mm, entretanto uma polia desse porte teria um elevado custo bem como elevada inércia;

b) Diâmetro do mínimo do furo: 10 mm.

Justificativa: Furo deve possuir a mesma dimensão do eixo motriz. Dessa forma o furo mínimo permissível deve ser maior que 10 mm;

Sendo assim, entra-se na tabela a seguir com o valor da rotação do eixo mais rápido (8 rpm) e seleciona-se o fator adequado, que no caso é 0,01 Hp.

Tabela 4: Potência nominal permitida (passo 5 mm)

RPM of Faster Shaft	Base Rated Horsepower for Small Sprocket (Number of Grooves and Pitch Diameter, Inches)																																	
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	28	30	32	34	36	38	40	44	45	48	50	52	56	60	64	68	72								
	1.128	1.191	1.253	1.316	1.379	1.441	1.504	1.566	1.629	1.754	1.889	2.005	2.130	2.256	2.381	2.506	2.757	2.820	3.000	3.133	3.259	3.589	3.760	4.010	4.261	4.512								
10	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06	0.07	0.07	0.08								
20	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	0.06	0.06	0.06	0.07	0.07	0.08	0.08	0.09	0.10	0.10	0.11	0.12	0.13	0.14	0.15								
40	0.04	0.05	0.05	0.06	0.06	0.06	0.07	0.07	0.08	0.09	0.10	0.10	0.11	0.12	0.13	0.14	0.16	0.16	0.17	0.18	0.19	0.21	0.22	0.24	0.25	0.26								
60	0.06	0.07	0.07	0.08	0.08	0.09	0.09	0.10	0.11	0.12	0.14	0.15	0.16	0.18	0.19	0.20	0.22	0.23	0.25	0.26	0.27	0.30	0.32	0.35	0.37	0.39								
100	0.09	0.10	0.11	0.12	0.14	0.15	0.16	0.17	0.18	0.20	0.22	0.24	0.26	0.28	0.30	0.32	0.36	0.37	0.40	0.42	0.44	0.48	0.51	0.55	0.59	0.62								
200	0.17	0.19	0.21	0.23	0.25	0.27	0.29	0.31	0.33	0.36	0.40	0.44	0.48	0.52	0.56	0.59	0.67	0.69	0.74	0.78	0.82	0.89	0.97	1.04	1.11	1.18								
300	0.24	0.26	0.29	0.32	0.35	0.38	0.41	0.44	0.47	0.52	0.58	0.63	0.69	0.75	0.80	0.86	0.96	0.99	1.07	1.13	1.18	1.29	1.39	1.50	1.60	1.69								
400	0.30	0.34	0.37	0.41	0.45	0.49	0.52	0.56	0.60	0.67	0.75	0.82	0.89	0.96	1.04	1.11	1.25	1.28	1.39	1.46	1.53	1.67	1.81	1.94	2.08	2.20								
500	0.36	0.41	0.45	0.50	0.54	0.59	0.64	0.68	0.73	0.82	0.91	1.00	1.09	1.17	1.26	1.35	1.52	1.57	1.70	1.78	1.87	2.04	2.21	2.38	2.54	2.69								
600	0.42	0.47	0.53	0.58	0.64	0.69	0.74	0.80	0.85	0.96	1.06	1.17	1.27	1.38	1.48	1.59	1.79	1.84	2.00	2.10	2.20	2.40	2.60	2.80	3.00	3.20								
800	0.52	0.60	0.67	0.74	0.81	0.88	0.95	1.02	1.09	1.23	1.37	1.50	1.64	1.78	1.91	2.05	2.31	2.38	2.58	2.71	2.84	3.10	3.36	3.62	3.87	4.12								
1000	0.62	0.71	0.80	0.89	0.97	1.06	1.15	1.23	1.32	1.49	1.66	1.83	1.99	2.16	2.33	2.49	2.82	2.90	3.14	3.30	3.46	3.78	4.10	4.41	4.71	5.00								
1200	0.72	0.82	0.93	1.03	1.13	1.23	1.34	1.44	1.54	1.74	1.94	2.14	2.34	2.53	2.73	2.92	3.31	3.40	3.69	3.88	4.07	4.44	4.81	5.18	5.55	5.92								
1400	0.81	0.93	1.05	1.17	1.29	1.40	1.52	1.64	1.75	1.98	2.21	2.44	2.67	2.90	3.12	3.34	3.78	3.89	4.22	4.44	4.65	5.08	5.51	5.93	6.35	6.76								
1600	0.90	1.03	1.17	1.30	1.43	1.57	1.70	1.83	1.96	2.22	2.48	2.74	2.99	3.25	3.50	3.75	4.25	4.37	4.74	4.99	5.23	5.71	6.19	6.66	7.13	7.59								
1800	0.98	1.13	1.28	1.43	1.58	1.72	1.87	2.02	2.16	2.45	2.74	3.03	3.31	3.59	3.87	4.15	4.71	4.84	5.25	5.52	5.79	6.32	6.85	7.38	7.89	8.40								
2000	1.06	1.23	1.39	1.55	1.72	1.88	2.04	2.20	2.36	2.68	3.00	3.31	3.62	3.93	4.24	4.55	5.15	5.30	5.75	6.05	6.34	6.92	7.50	8.07	8.64	9.19								
2400	1.21	1.41	1.60	1.79	1.99	2.18	2.37	2.56	2.75	3.12	3.49	3.86	4.23	4.59	4.95	5.31	6.02	6.19	6.72	7.06	7.40	8.08	8.75	9.41	10.1	10.7								
2800	1.35	1.58	1.80	2.02	2.24	2.46	2.68	2.90	3.11	3.54	3.97	4.39	4.81	5.23	5.64	6.04	6.85	7.05	7.64	8.04	8.42	9.19	9.95	10.7	11.4	12.1								
3200	1.49	1.74	1.99	2.24	2.49	2.74	2.98	3.22	3.47	3.95	4.43	4.90	5.37	5.84	6.30	6.75	7.65	7.87	8.53	8.97	9.40	10.2	11.1	11.9	12.7	13.5								
3600	1.61	1.90	2.17	2.45	2.73	3.00	3.27	3.54	3.81	4.34	4.87	5.40	5.91	6.43	6.93	7.43	8.42	8.66	9.39	9.86	10.3	11.3	12.2	13.0	13.9	14.7								
4000	1.73	2.04	2.34	2.65	2.95	3.25	3.55	3.84	4.14	4.72	5.30	5.87	6.43	6.99	7.54	8.09	9.16	9.42	10.2	10.7	11.2	12.2	13.2	14.1	15.0	15.8								
5000	2.00	2.38	2.74	3.11	3.48	3.84	4.20	4.56	4.91	5.61	6.31	6.99	7.66	8.32	8.97	9.61	10.9	11.2	12.1	12.6	13.2	14.3	15.4	16.4	17.4	18.3								
6000	2.23	2.67	3.10	3.53	3.96	4.37	4.79	5.20	5.62	6.42	7.22	8.00	8.76	9.51	10.2	11.0	12.3	12.7	13.7	14.3	14.9	16.1	17.1	18.1	19.1	20.0								
8000	2.59	3.15	3.69	4.23	4.76	5.28	5.80	6.31	6.81	7.80	8.76	9.69	10.6	11.5	12.3	13.1	14.6	14.9	15.9	16.6														
10000	2.82	3.47	4.11	4.74	5.36	5.96	6.56	7.14	7.72	8.82	9.89	10.9	11.8	12.7	13.6	14.4																		
12000	2.91	3.65	4.36	5.06	5.75	6.41	7.06	7.68	8.30	9.46	10.5	11.5																						
14000	2.86	3.66	4.42	5.17	5.90	6.59	7.26	7.90	8.52	9.65																								

Deve-se, na sequência, calcular a potência corrigida para uma dada correia, multiplicando-se a potência nominal da mesma por um fator de correção para o comprimento da correia, cuja tabela encontra-se abaixo:

Tabela 5: Fator de correção em função do tamanho da correia

Pitch/Length Designation	No. of Teeth	Correction Factor	Pitch/Length Designation	No. of Teeth	Correction Factor	Pitch/Length Designation	No. of Teeth	Correction Factor	Pitch/Length Designation	No. of Teeth	Correction Factor
SMR-300	60	0.77	SMR-500	100	0.90	SMR-700	140	1.00	SMR-1300	260	1.16
SMR-355	71	0.81	SMR-535	107	0.92	SMR-750	150	1.01	SMR-1450	290	1.19
SMR-375	75	0.83	SMR-565	113	0.94	SMR-800	160	1.03	SMR-1600	320	1.22
SMR-400	80	0.84	SMR-580	116	0.95	SMR-850	170	1.05	SMR-1720	344	1.24
SMR-405	81	0.85	SMR-600	120	0.95	SMR-900	180	1.06	SMR-2100	420	1.29
SMR-425	85	0.86	SMR-625	125	0.97	SMR-1000	200	1.09			
SMR-450	90	0.88	SMR-650	130	0.98	SMR-1150	230	1.13			

Para 90 dentes, o fator é 0.88. Portanto a potência corrigida é igual a 0,008Hp, que equivale a 6,6 W. Considerando que a potência a ser transmitida por cada correia é da ordem de 4,9W, a correia com largura 15 mm é adequada a este propósito.

Finalmente, os elementos selecionados foram:

Polias motrizes:

Tipo: HTD 5M (High Torque Drive, passo métrico de 5 mm)

Número de dentes: 19; Diâmetro primitivo: 30,23 mm; Largura: 15 mm

Número de dentes: 38; Diâmetro primitivo: 60.47 mm; Largura: 15mm

Correias:

Tipo: Optibelt 5M-B OMEGA (passo métrico de 5 mm)

Número de dentes: 90

Comprimento primitivo da circunferência: 450 mm

Esta correia é ideal para aplicações em baixa velocidade e alto torque. São feitas em neoprene.

3.3.4.2. Transmissão por rosca sem fim

Inicialmente, o motorreductor a ser utilizado para a transmissão de potência ao eixo do braço do robô possuía, o que os fabricantes costumam chamar, dupla saída. Isto significa que na saída de sua redução existem duas saídas de eixo, concêntricas e com mesma rotação e torque de saída. Nesta situação, seriam acoplados dois eixos, conforme figura a seguir:

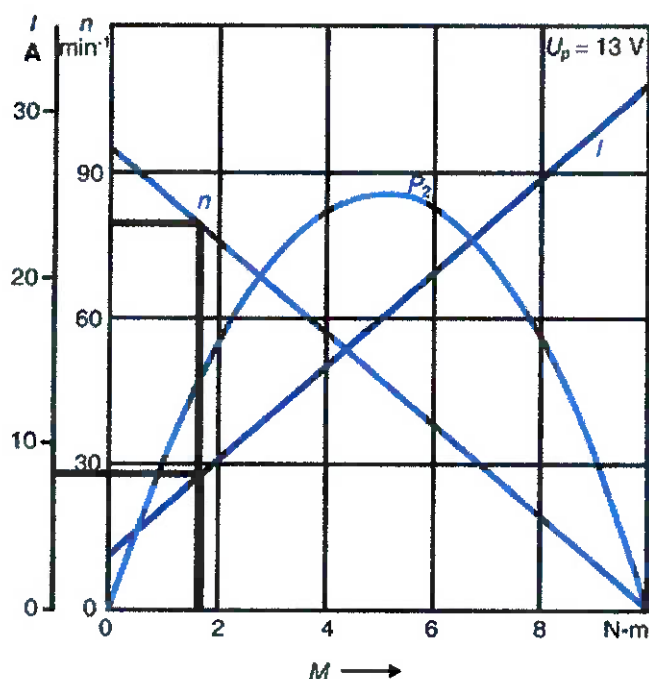


Figura 49: Curva do motorreductor a ser utilizado.

Portanto, uma transmissão que atende ao requisito de torque do projeto seria a de redução 5:1, não atende ao requisito de rotações por minuto. Necessitando utilizar uma redução de 10 vezes. O que necessitaria de um torque de saída do motorreductor de 0,9N.m, valor este abaixo do encontrado no gráfico corrente x torque. O que não representa empecilho algum à aplicação desejada. Para ajustar o torque para 0,9N.m a corrente diminui e a rotação aumenta um pouco, o que não implica em nenhum tipo de complicação ao projeto.

Com o intuito de aproximar o centro de gravidade do robô do eixo de rotação do braço (o que reduziria a solicitação do motor para desvirar o robô), optou-se em utilizar uma transmissão perpendicular. Neste caso o eixo do motorreductor é concorrente ao eixo movido, como é ilustrado na figura 37. Além disso, ainda existe o problema dimensional. É de fundamental importância que todo o conjunto motorreductor, transmissão, eixo e polia sincronizadora (também indicados na figura 37) permaneçam dentro da região delimitada pelas esteiras (uma faixa de 120mm).

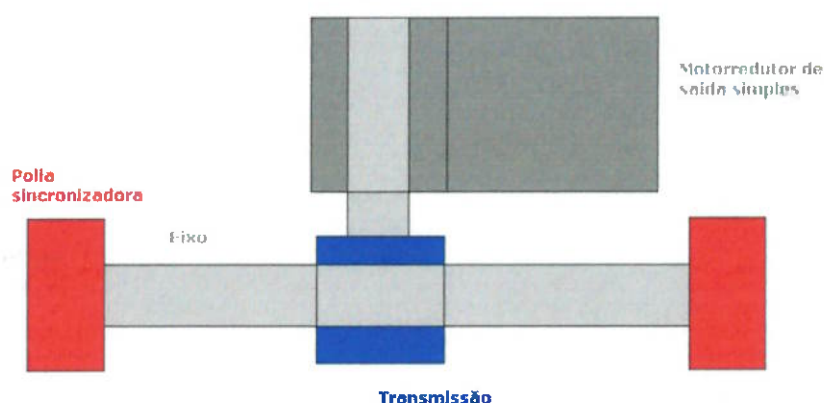


Figura 50: Representação esquemática da transmissão com motorreductor de saída simples.

Para atender a esse requisito, analisou-se a possibilidade de utilizar engrenagens de dentes cônicos. Inicialmente foi realizado um levantamento de possíveis modelos de engrenagens cônicas que poderiam fornecer a redução projetada. Após a pesquisa verificou-se que os modelos encontrados possuíam dimensões superiores às esperadas e redução de apenas cinco vezes (não atendendo ao requisito de velocidade de rotação do eixo). Por exemplo, um dos modelos analisados foi o SB1.5-6012 da empresa Quality Transmission Components: sua coroa, possui 60 dentes e diâmetro externo de 90,33mm e seu pinhão, 12 dentes e diâmetro externo de 22,24mm, o que fornece uma redução 5:1. Portanto foi descartada a possibilidade de utilizar este tipo de transmissão.

Outra possibilidade de transmitir potência através dos eixos perpendiculares é utilizando uma transmissão do tipo rosca sem fim. O maior problema que este tipo de transmissão é a reduzida eficiência, geralmente apresenta valores próximos de 50% ou menores. Dessa forma, com um torque de entrada no parafuso sem fim de 1,8N.m, na saída, o torque será de 9Nm (considerando rendimento de 50%).

Depois de decidida o tipo de transmissão a ser utilizada, o próximo passo é definir as características do parafuso e da engrenagem do sem fim. Para auxiliar nesse trabalho foi utilizado o software “Coroa e Sem-Fim”, desenvolvido por Marcos e Humberto Gobatto. Onde o usuário entre com algumas informações como o módulo (ou diâmetro primitivo da coroa, estes dois parâmetros estão diretamente ligados), definido pela relação a seguir:

$$M = \frac{D_p}{Z_c}$$

Onde:

D_p : diâmetro primitivo da coroa;

Z_c : número de dentes da coroa.

Outro parâmetro é o número de dentes da coroa e o número de entradas do Sem Fim (a quantidade de filetes), estes dois parâmetros, mais as rotações de entrada ou de saída do redutor, determinam a redução da transmissão. A equação entre que relaciona estas grandezas é:

$$N_c = \frac{N_p \cdot N_E}{Z_c}$$

Onde:

N_c : rotação na saída no redutor;

N_p : rotação de entrada no redutor;

N_E : número de filetes no parafuso sem fim.

A distância entre centros (E) é fornecida pela seguinte relação:

$$E = \frac{D_p + d_p}{2}$$

Onde: d_p : é o diâmetro primitivo do parafuso sem fim.

Com estas informações, mais o valor do ângulo de pressão, o programa se encarrega de fazer todo o dimensionamento. A tela de entrada de dados é a seguinte:

Coroa e Sem-Fim

Opções
☐ Módulo ☒ Diâmetro Primitivo

Tipo de Entrada...
☒ À Direita ☐ À Esquerda

Diâmetro Primitivo da Coroa 30
Número de Dentes da Coroa 20
Núm. de Entradas Sem-Fim 2
Distância entre Centros 27
Ângulo de pressão A P 20° 0' 0"

Coroa

Módulo.....	M =	1.50
Diâmetro Primitivo.....	DP =	30.000
Diâmetro Externo.....	DE =	33.000
Diâmetro Interno.....	DI =	26.499
Diâmetro Max. Ext.....	D1 =	34.000
Número de Dentes.....	N =	20
Largura da Coroa.....	A =	16.215
Concavidade.....	Rc =	10.500
Raio Cab. do Dente.....	r =	1.178
Ângulo da Hélice.....	β_1 =	7° 7'
Rel. de Transmissão.....	P =	0.100 : 1
Relação de Redução.....	Rr =	10.000 : 1

Sem-Fim

Passo.....	P =	4.712
Passo da hélice.....	Ph =	9.425
Número de Entradas.....	NE =	2 À Direita
Diâmetro Primitivo.....	Dp =	24.000
Diâmetro Externo.....	De =	27.000
Diâmetro Interno.....	Dj =	20.499
Alt. Cabeça do Filete.....	L =	1.500
Alt. Total do Filete.....	h =	3.251
Espessura do Filete.....	e =	2.356
Espas. dos Filetes.....	c =	2.356
Raio Cab. do Dente.....	R =	0.236
Largura Roscada.....	LR =	23.091
Tangente do Ângulo.....	r =	0.125
Ângulo da Hélice.....	β_2 =	7° 7'
Altura do Pé do Dente.....	i =	1.751
Largura Fundo do Dente.....	T =	1.082
Largura Cabeça Dente.....	Cb =	1.264
Folga Pé do Dente.....	f =	0.251
Distância entre Centros.....	E =	27.000

Botões: Calcular, Editor, Desenho, Imprimir, Sair, Casas Decimais (0.000, 0.0000)

Figura 51: Tela para entrada de dados, no software “Coroa e Sem-Fim”

Gerando um desenho com a indicação de cada parâmetro e os respectivos valores para eles (dependendo das entradas fornecidas ao programa). Para a análise apresentada na Figura 51, segue o seguinte desenho:

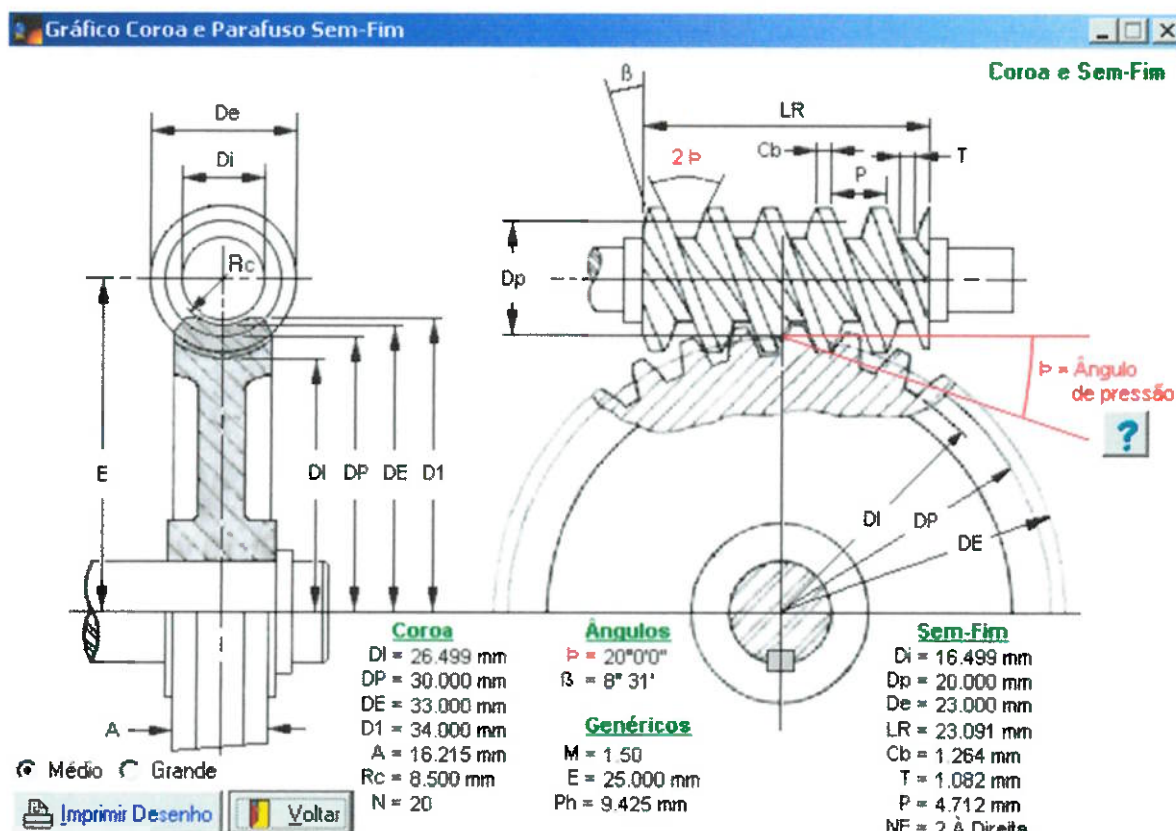


Figura 52: Desenho da coroa e parafuso sem fim, fornecidos pelo software “Coroa e Sem-Fim”.

Para ajudar na tomada de decisão, foi construída uma tabela, na qual as entradas fixas são ângulo de pressão, número de dentes e número de entradas no sem fim (ou número de filetes). Na presente situação, a velocidade fornecida ao motorreductor é 80rpm (calculado graficamente, Figura 49) e a saída 8rpm (especificação do projeto). O número de dentes é 20 e o de filetes é 2, caracterizando uma redução de dez vezes. O ângulo de pressão a ser utilizado é 20° , valor este recomendado pelo próprio programa para engrenagens entre 17 e 22 dentes. Variando o módulo e a distancia entre centros foi obtida a seguinte tabela:

Tabela 6: Dimensões da coroa e do parafuso sem fim

			Coroa						Sem Fim							
E	Módulo	α	Dp	De	Di	D1	L	Rc	Dp	De	Di	T	β_2	Passo	Ph	
25	1	20	20	22	17,67	23	12,48	14	30	32	27,67	0,721	3°48	3,142	6,283	
26	1	20	20	22	17,67	23	12,48	15	32	34	29,67	0,721	3°34	3,142	6,28	
27	1	20	20	22	17,67	23	12,48	16	34	36	31,67	0,721	3°21	3,142	6,28	
28	1	20	20	22	17,67	23	12,48	17	36	38	33,67	0,721	3°10	3,142	6,28	
29	1	20	20	22	17,67	23	12,48	18	38	40	35,67	0,721	3°0	3,142	6,28	
30	1	20	20	22	17,67	23	12,48	19	40	42	37,67	0,721	2°51	3,142	6,28	
31	1	20	20	22	17,67	23	12,48	20	42	44	39,67	0,721	2°43	3,142	6,28	
32	1	20	20	22	17,67	23	12,48	21	44	46	41,67	0,721	2°36	3,142	6,28	
33	1	20	20	22	17,67	23	12,48	22	46	48	43,67	0,721	2°29	3,142	6,28	
34	1	20	20	22	17,67	23	12,48	23	48	50	45,67	0,721	2°23	3,142	6,28	
35	1	20	20	22	17,67	23	12,48	24	50	52	47,67	0,721	2°17	3,142	6,28	
25	1,25	20	25	27,5	22,08	28	14,35	11,25	25	27,5	22,08	0,902	5°42	3,927	7,854	
26	1,25	20	25	27,5	22,08	28	14,35	12,25	27	29,5	24,08	0,902	5°17	3,927	7,854	
27	1,25	20	25	27,5	22,08	28	14,35	13,25	29	31,5	26,08	0,902	4°55	3,927	7,854	
28	1,25	20	25	27,5	22,08	28	14,35	14,25	31	33,5	28,08	0,902	4°36	3,927	7,854	
29	1,25	20	25	27,5	22,08	28	14,35	15,25	33	35,5	30,08	0,902	4°19	3,927	7,854	
30	1,25	20	25	27,5	22,08	28	14,35	16,25	35	37,5	32,08	0,902	4°05	3,927	7,854	
31	1,25	20	25	27,5	22,08	28	14,35	17,25	37	39,5	34,08	0,902	3°51	3,927	7,854	
32	1,25	20	25	27,5	22,08	28	14,35	18,25	39	41,5	36,08	0,902	3°40	3,927	7,854	
33	1,25	20	25	27,5	22,08	28	14,35	19,25	41	43,5	38,08	0,902	3°29	3,927	7,854	
34	1,25	20	25	27,5	22,08	28	14,35	20,25	43	45,5	40,08	0,902	3°19	3,927	7,854	
35	1,25	20	25	27,5	22,08	28	14,35	21,25	45	47,5	42,08	0,902	3°10	3,927	7,854	
25	1,5	20	30	33	26,5	34	16,22	8,5	20	23	16,5	1,082	8°31	4,712	9,425	
26	1,5	20	30	33	26,5	34	16,22	9,5	22	25	18,5	1,082	7°45	4,712	9,425	
27	1,5	20	30	33	26,5	34	16,22	10,5	24	27	20,5	1,082	7°07	4,712	9,425	
28	1,5	20	30	33	26,5	34	16,22	11,5	26	29	22,5	1,082	6°34	4,712	9,425	
29	1,5	20	30	33	26,5	34	16,22	12,5	28	31	24,5	1,082	6°06	4,712	9,425	
30	1,5	20	30	33	26,5	34	16,22	13,5	30	33	26,5	1,082	5°42	4,712	9,425	
31	1,5	20	30	33	26,5	34	16,22	14,5	32	35	28,5	1,082	5°21	4,712	9,425	
32	1,5	20	30	33	26,5	34	16,22	15,5	34	37	30,5	1,082	5°02	4,712	9,425	
33	1,5	20	30	33	26,5	34	16,22	16,5	36	39	32,5	1,082	4°45	4,712	9,425	
34	1,5	20	30	33	26,5	34	16,22	17,5	38	41	34,5	1,082	4°30	4,712	9,425	
35	1,5	20	30	33	26,5	34	16,22	18,5	40	43	36,5	1,082	4°17	4,712	9,425	

Tabela 6: Dimensões da coroa e do parafuso sem fim (continuação)

25	1,75	20														
26	1,75	20														
27	1,75	20														
28	1,75	20														
29	1,75	20	35	38,5	30,92	40	18,09	9,75	23	26,5	18,97	1,262	8°39	5,498	10,97	
30	1,75	20	35	38,5	30,92	40	18,09	10,75	25	28,5	20,97	1,262	7°58	5,498	11	
31	1,75	20	35	38,5	30,92	40	18,09	11,75	27	30,5	22,97	1,262	7°23	5,498	11,03	
32	1,75	20	35	38,5	30,92	40	18,09	12,75	29	32,5	24,97	1,262	6°52	5,498	11	
33	1,75	20	35	38,5	30,92	40	18,09	13,75	31	34,5	26,97	1,262	6°26	5,498	11	
34	1,75	20	35	38,5	30,92	40	18,09	14,75	33	36,5	28,97	1,262	6°03	5,498	11	
35	1,75	20	35	38,5	30,92	40	18,09	15,75	35	38,5	30,97	1,262	5°42	5,498	11	
25	2	20														
26	2	20														
27	2	20														
28	2	20														
29	2	20														
30	2	20														
31	2	20														
32	2	20														
33	2	20	40	44	35,33	46	19,95	11	26	30	21,33	1,443	8°44	6,283	12,566	
34	2	20	40	44	35,33	46	19,95	12	28	32	23,33	1,443	8°07	6,283	12,6	
35	2	20	40	44	35,33	46	19,95	13	30	34	25,33	1,443	7°35	6,283	12,634	

As células em vermelho indicam que o diâmetro interno do sem fim é muito pequeno para as informações de entrada.

Um critério muito importante para a escolha do parafuso e da engrenagem sem fim é a distância entre centros. Como existe uma grande restrição dimensional, já que o conjunto deve ficar abaixo da linha da esteira motora. Portanto menores distâncias são mais adequadas. O diâmetro externo também precisa ser considerado, novamente para não exceder a linha das esteiras. Para ilustrar essas dimensões consideradas críticas ao projeto segue a figura:

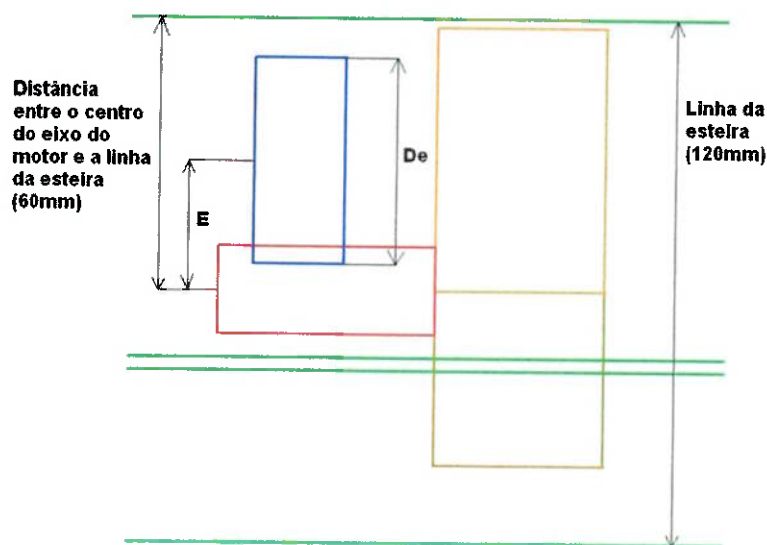


Figura 53: Representação: principais dimensões do sem fim, linha da esteira e distância entre centros do eixo do motor e linha da esteira.

Para esta aplicação, as engrenagens de módulo 1,75 e 2 possuem o diâmetro externo muito grande, restando apenas uma pequena folga entre a extremidade da coroa e linha da esteira. Dessa forma, este grupo de engrenagens também pode ser descartado. O único grupo remanescente foi os conjuntos de módulo 1,5.

Para módulo 1,5, a coroa possui um diâmetro interno de 26,5mm (diâmetro primitivo de 30mm, diâmetro externo de 33mm, diâmetro máximo de 34mm e largura da engrenagem de 16,22mm), suficiente para ser acoplada, por parafusos de fixação, a um eixo de 12mm de diâmetro. Seleccionada a engrenagem do sem fim, o próximo passo é determinar a distância entre os eixos do sem fim e da coroa. Sabendo que a distância entre o centro do eixo do sem fim e a linha da esteira é de 60mm, é preciso encontrar o melhor valor para E possível. Quanto menor for este valor melhor será. Isto por causa dos mancais, onde estão alojados os rolamentos do eixo da coroa, dessa forma, quanto maior for a distância entre o centro deste eixo e a estrutura que sustenta todos os elementos do robô, mais alto estarão os rolamentos, por conseguinte maior será a altura do mancal como um todo. Sendo assim, considerando todos os fatores supracitados, as distâncias entre eixos mais adequadas à presente aplicação são as de 25, 26, 27 e 28mm. A partir destas distâncias é possível definir as dimensões do parafuso.

Como a idéia principal é construir a rosca sem fim diretamente no eixo, isto é, sem a necessidade de nenhum tipo de acoplamento, o diâmetro interno do mesmo pode ser reduzido ao máximo. Para tanto, determinou-se que a distancia entre centros é 25mm. Portanto, o sem fim escolhido é o de diâmetro primitivo 20mm (diâmetro externo de 23mm e largura da rosca de 23,09mm, 20 dentes, fabricada em aço).

Para verificar a resistência aos esforços, procurou-se um conjunto similar para que, dessa forma fosse possível realizar uma estimativa dos esforços permitidos. O modelo de engrenagem mais próximo do escolhido foi o AG1.5-20R2, fabricante: Quality Transmission Components. Suas principais dimensões são: diâmetro primitivo 33mm, diâmetro interno 30, diâmetro externo 34,5mm e largura da coroa de 14mm. O parafuso desta engrenagem possui: diâmetro primitivo 25mm, diâmetro externo 28mm, dois filetes, largura da região com rosca 14mm e feita com uma liga Alumínio-bronze. Para este modelo o fabricante determinou que o máximo torque permitido em sua coroa é: 0,99kgf.m, aproximadamente 9,9N.m (a 30 rpm), valor este um pouco acima do especificado para o projeto (que é de 9N.m). Para o protótipo, utilizou-se um conjunto feito em poliacetal, um polímero muito utilizado na fabricação de engrenagens, já que apresenta estabilidade dimensional e autolubrificação. A Figura 54 mostra a disposição do par sem fim utilizado.



Figura 54: Par sem fim

3.4. Estrutura

3.4.1. Diretrizes gerais de projeto

O que se buscou com o projeto da estrutura foi garantir que a mesma suportasse os esforços solicitantes, dentre os quais destacam-se:

- Tensão a ser aplicada na esteira, a fim de não permitir a patinação da mesma em relação às polias.
- Peso do equipamento em condições especiais, tais como subida de escadas ou situações onde o equipamento tem que enfrentar terrenos acidentados.

Somando-se a isso, temos a necessidade de uma estrutura com baixo peso e que não seja frágil, resistindo a pequenos choques.

Sendo assim, optou-se inicialmente pela utilização de uma estrutura base feita com uma chapa de alumínio de espessura 3 mm. Intuitivamente, já era de se esperar que apenas esta chapa não atenderia os requisitos de manter o robô com as polias tracionadas sem que sofresse elevadas deformações, bem como possuísse rigidez suficiente para não desalinhar as polias da esteira o que eventualmente poderia fazer com que a mesma saísse de sua posição de trabalho.

Sendo assim, procedeu-se análise de alternativas de reforço para a estrutura e realização de simulações computacionais através do método dos elementos finitos, a fim de que pudessemos melhorar sua rigidez.

3.4.2. Simulações computacionais de alternativas de estruturas utilizando o método dos elementos finitos (MEF)

O programa utilizado nas simulações que seguem, foi o COSMOS Design Star versão 3.0. Primeiramente, para que o modelo pudesse ser construído, uma etapa inicial de estimativa dos carregamentos foi realizada, a fim de permitir a construção de um cenário para o carregamento mais próximo possível da realidade.

Considerou-se o seguinte cenário para o carregamento da estrutura: 2/3 do seu peso apoiado de um dos lados do robô (100 N, aproximadamente), sendo que desses 100 N, a distribuição de peso entre os eixos dianteiro e traseiro adotada foi de 75% do carregamento no eixo dianteiro e os 25% restantes aplicados no eixo traseiro. Somando-se a esse carregamento devido ao peso, temos o carregamento devido à tensão na esteira, de magnitude 119 N. A figura abaixo ilustra os carregamentos atuantes na estrutura:



Figura 55: Carregamentos na estrutura

Sendo assim, buscou-se simular o comportamento de diferentes tipos de estruturas quando submetida a esforços da magnitude acima citada, fazendo uso do fato de que a estrutura apresenta uma simetria, e, portanto pode ser simulada apenas metade da mesma.

3.4.2.1. Estrutura simples com reforço lateral de perfil “T”

Esta estrutura é composta somente de uma chapa de alumínio base, 3 mm de espessura, reforçada lateralmente com dois perfis “T”, de dimensões mostradas na figura abaixo:

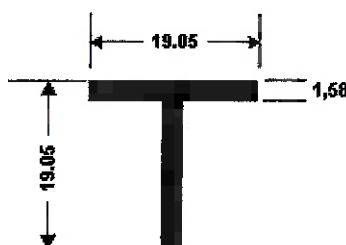


Figura 56: Perfil T

Os perfis utilizados como reforço serão arrebitados na chapa de alumínio principal, uma vez que a principal solicitação da fixação é o cisalhamento.

Analisando os resultados para esta configuração de estrutura, observa-se que:

- A magnitude do deslocamento na parte dianteira da estrutura foi da ordem de 1,87 mm, o que é elevado para nossas necessidades;
- Não houve pontos na estrutura onde houvesse concentração de tensões realmente relevantes.

Cabe aqui buscar outras alternativas e realizar reforços na estrutura a fim de diminuir a magnitude do deslocamento na parte dianteira.

Estrutura mais simples-Deformao :: Static Displacement
 Units : mm Deformation Scale 1 : 28.6652

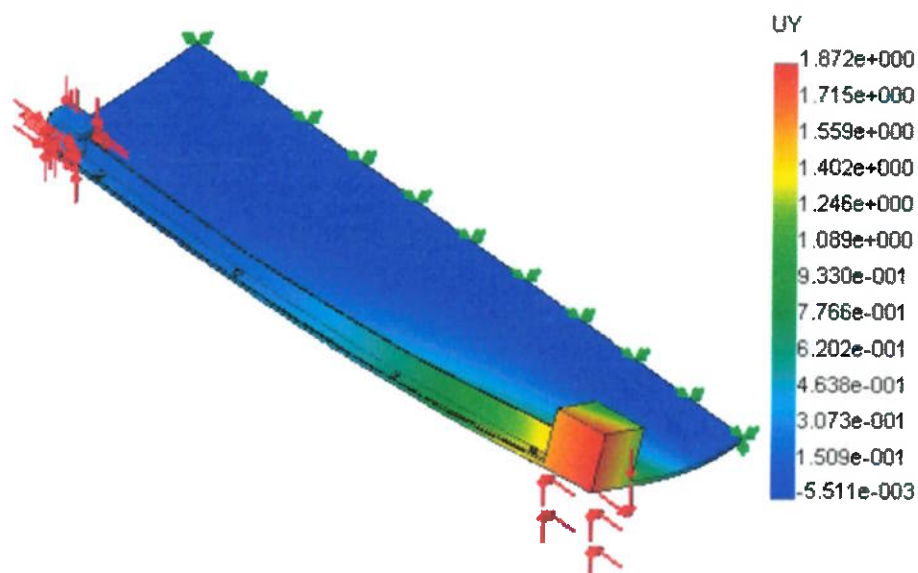


Figura 57: Deformações na estrutura simples

Estrutura mais simples-Deformao :: Static Nodal Stress
 Units : N/m² Deformation Scale 1 : 28.6652

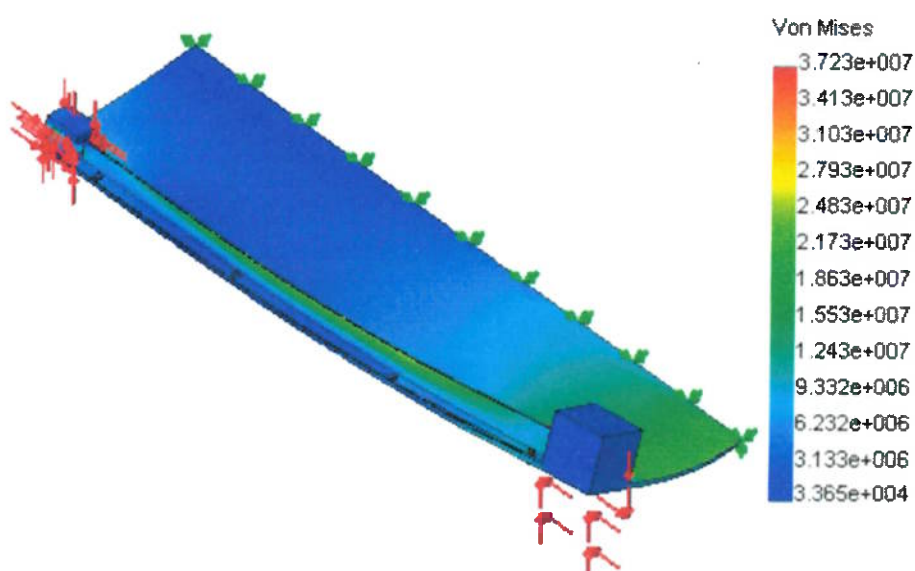


Figura 58: Tensões na estrutura simples

3.4.2.2. Estrutura com borda e reforço lateral de perfil T

Nesta configuração, utilizou-se o mesmo tipo de reforço do item anterior (T), acrescentando à parte dianteira da estrutura uma borda dobrada, de mesma espessura da estrutura, cujo detalhe encontra-se abaixo:

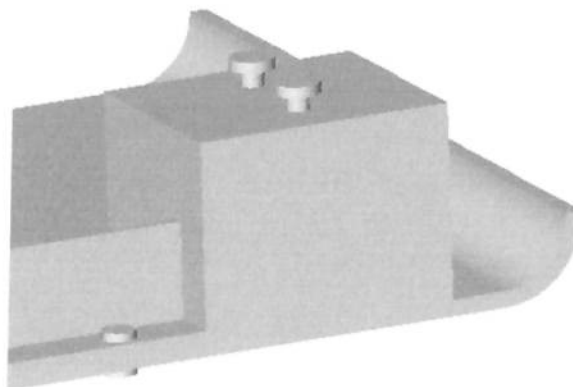


Figura 59: Dobra dianteira em detalhe

Analisando os resultados, nota-se que a magnitude do deslocamento na parte dianteira (crítico no caso anterior) foi resolvido, passando agora a ser da ordem de 0,3 mm, enquanto que a maior deformação ocorre na parte traseira da estrutura, tendo magnitude de 0,56 mm.

A análise dos resultados nos permitiu concluir que para este caso, as deformações na estrutura melhoraram bastante, atendendo o que se deseja.

Por outro lado, surgiram para esta configuração tensões elevadas no meio da dobra, o que sugere a necessidade da utilização de uma barra de amarração ligando as duas caixas de rolamentos dianteiras, solução esta que será futuramente analisada.

Estrutura dobra e T-Deformao :: Static Displacement
 Units : mm Deformation Scale 1 : 99.3485

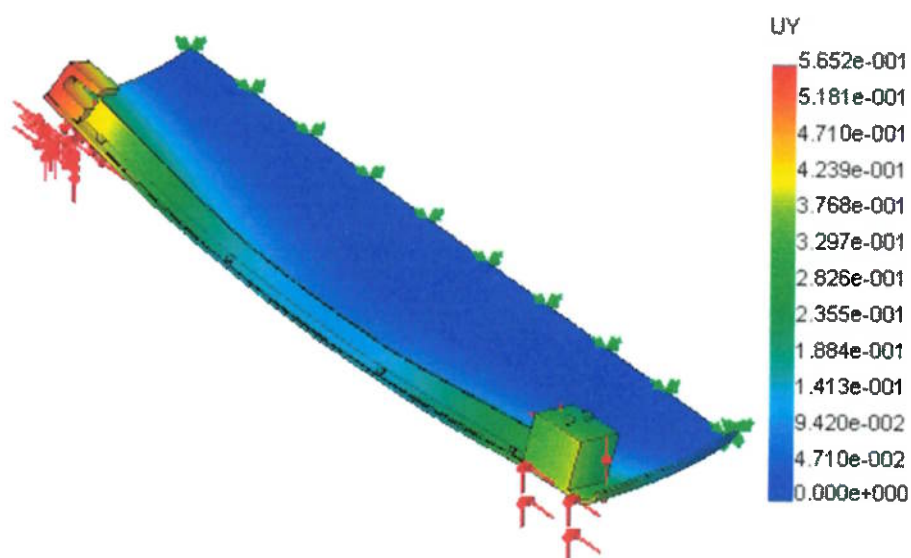


Figura 60: Deslocamentos na estrutura com reforço "T"

Estrutura dobra e T-Deformao :: Static Nodal Stress
 Units : N/m^2 Deformation Scale 1 : 99.3485



Figura 61: Tensões na estrutura com reforço "T"

3.4.2.3. Estrutura com borda e reforço lateral de perfil T maior

Desta vez, analisou-se um reforço com formato T também, mas desta vez com as dimensões mostradas abaixo:

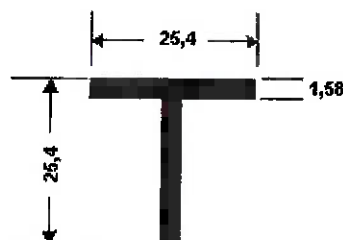


Figura 62: Perfil T de maior dimensão

Era esperada uma menor deformação nas regiões críticas da estrutura (regiões próximas ao esticador traseiro e mancal do eixo dianteiro), o que de fato ocorreu (esta última apresentou uma deformação de 0,425 mm, o seja, 75% do valor anteriormente obtido).

Estrutura dobra e T gde-Deformaes :: Static Displacement
Units : mm Deformation Scale 1 : 132.095

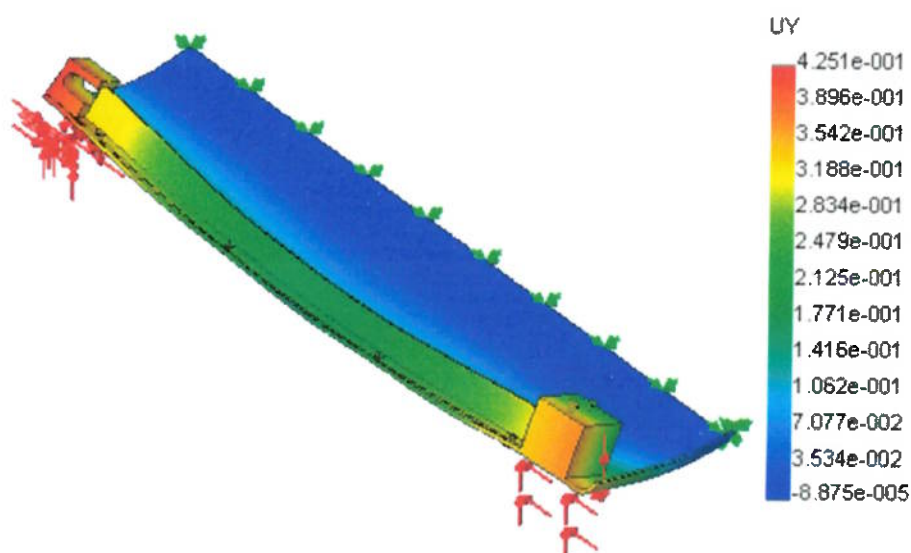


Figura 63: Deformações na estrutura com reforço "T" de maior dimensão

Mesmo apresentando melhor valor para a rigidez da estrutura, este reforço foi descartado, uma vez que o acréscimo de peso do mesmo não compensaria o retorno obtido com o aumento da rigidez.

Estrutura dobra e T gde-Deformaes :: Static Nodal Stress
Units : N/m² Deformation Scale 1 : 132.095

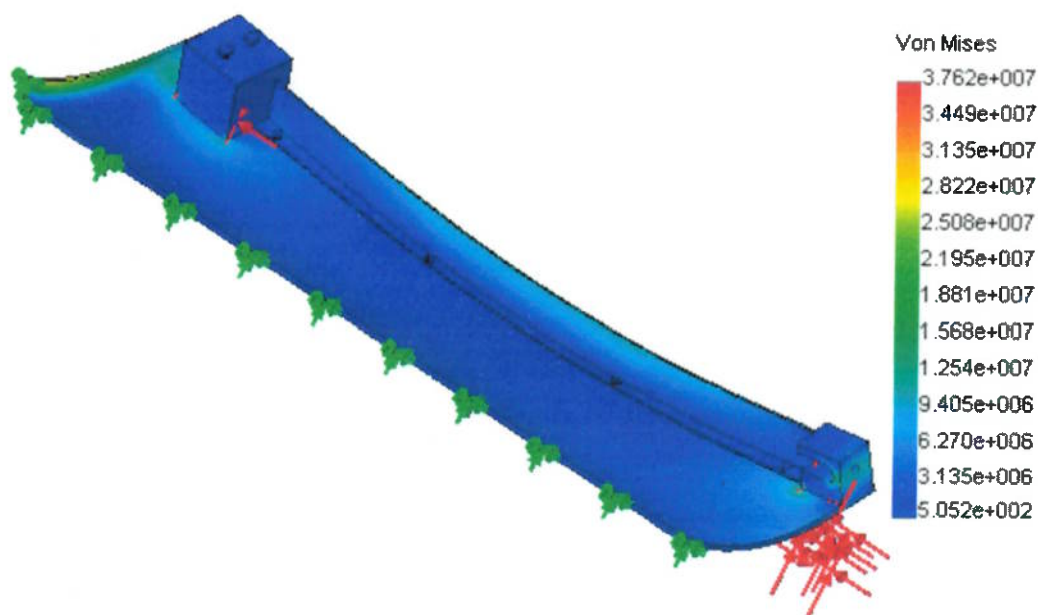


Figura 64: Tensões na estrutura com reforço "T" de maior dimensão

3.4.2.4. Estrutura com borda e reforço lateral de perfil retangular

Um outro tipo de reforço também foi considerado para a estrutura: perfil retangular fechado, como o da figura abaixo:



Figura 65: Perfil retangular

Os perfis anteriormente analisados, embora forneçam resultados de rigidez melhores que o perfil em questão, tornam um possível acoplamento futuro de um esticador um tanto quanto complicado, já que a porção vertical do perfil T (parte fina) apresenta baixa rigidez.

Finalmente, este perfil fornece magnitudes de deslocamento da ordem de 0,85 mm, que são adequadas aos nossos propósitos, mas por outro lado também apresenta pontos de alta tensão na estrutura que assim como no caso anteriormente comentado pode ser corrigida com a adoção de uma barra de amarração entre os suportes dos mancais, na parte dianteira. Vale lembrar que a simulação efetuada para esta estrutura não levou em conta a existência de um eixo traseiro que atravessa toda a extensão da estrutura, feito em aço. Este eixo, além de ser o eixo das polias traseiras, tem função estrutural, e permitirá aliviar a tensão na parte da frente da placa, bem como diminuir a magnitude do deslocamento na traseira.

Portanto, a solução a ser implementada será implementar um perfil retangular como o aqui analisado.

Estrutura-quadrado-ricardo-Deslocamento :: Static Displacement
Units : mm Deformation Scale 1 : 65.4584

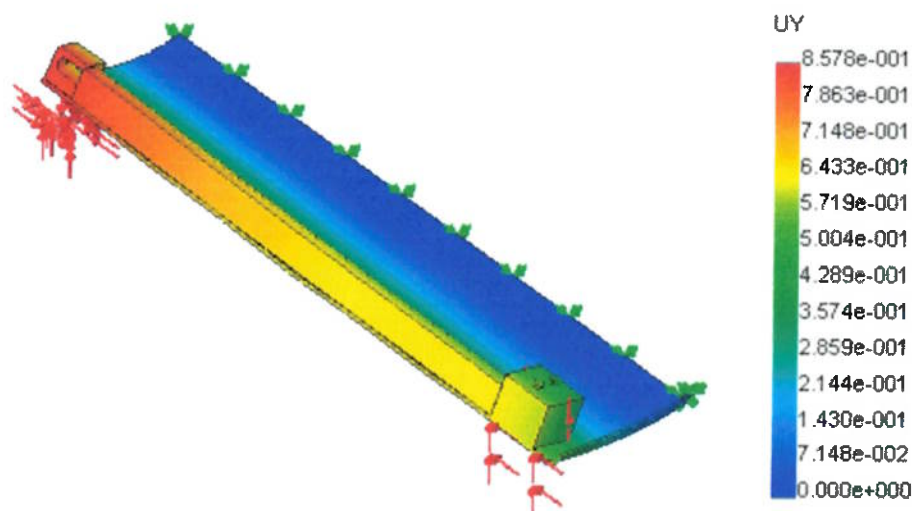


Figura 66: Deslocamento na estrutura com reforço quadrado

Estrutura-quadrado-ricardo-Deslocamento :: Static Nodal Stress
Units: N/m² Deformation Scale 1 : 65.4584

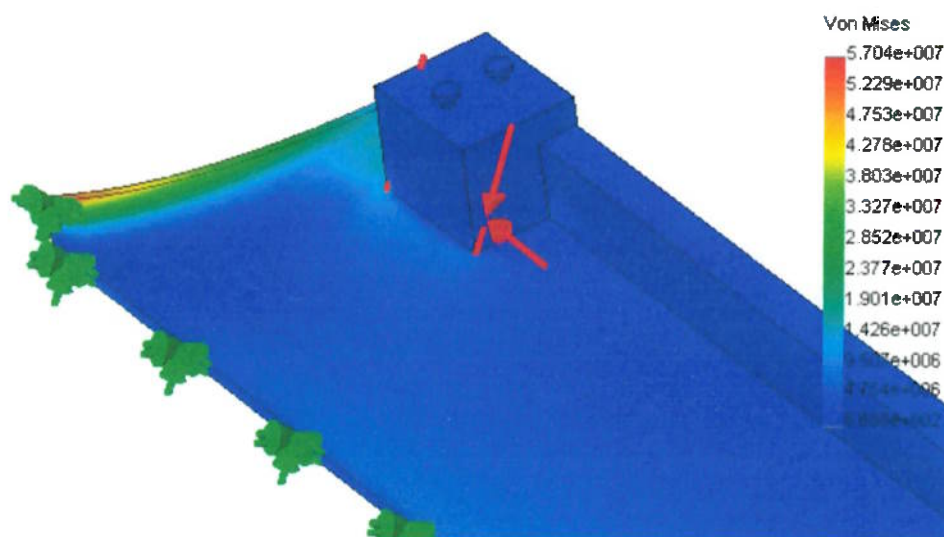


Figura 67: Tensões na estrutura com reforço quadrado

3.5. Conjunto traseiro (eixo e mancal)

3.5.1. Dimensões desejadas para o eixo traseiro

O eixo traseiro será feito de uma barra de $\frac{1}{2}$ polegada e suas extremidades deverão ser usinadas até o diâmetro de 10 mm para o alojamento dos rolamentos das polias. Como a polia tem 50 mm de espessura, o eixo deve ter uma parte rebaixada de mais de 50 mm e como o mancal do eixo ficará a apenas 3 mm da polia, tem-se a montagem da Figura 68.

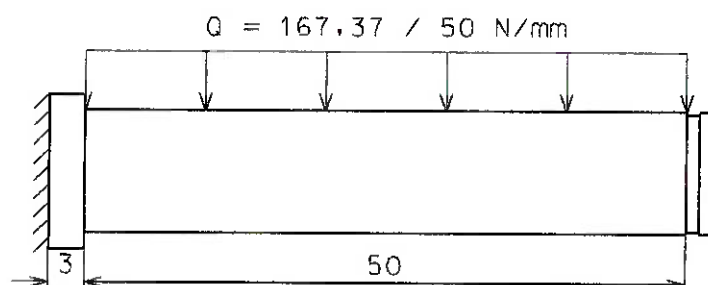


Figura 68: Modelo do eixo traseiro (medidas em mm)

No eixo real o pior caso de carregamento possível ocorre quando o robô está entrando na escada com um ângulo qualquer, supondo-se que por um instante este

fique equilibrado apenas por um braço dianteiro e pela polia traseira oposta, neste momento o eixo traseiro suportará por volta da metade do peso do robô e terá a metade da força de tração.

A reação ao peso será vertical para cima e a força de tração e de pré-tensão será na horizontal. Como a polia está acoplada ao eixo através de rolamentos apenas estas duas cargas estão agindo, não existindo torque aplicado nesse eixo, portanto pode-se encontrar a resultante dessas forças e considera-la uma única força aplicada. Analisando essa estrutura encontra-se o seguinte diagrama de tensões:

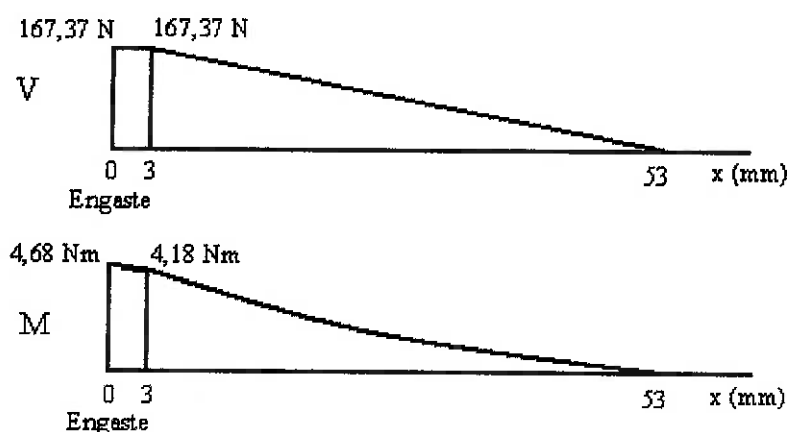


Figura 69: Diagrama de tensões

A partir deste diagrama é possível encontrar as seções críticas, a primeira ocorre em $x = 0$ e a segunda ocorre em $x = 3 \text{ mm}$.

Como a tensão crítica neste caso ocorrerá devido o momento fletor, analisar-se-á um elemento na extremidade do eixo, ou seja em y igual a $6,35 \text{ mm}$ e 5 mm , respectivamente, então:

$$\sigma_{x=0} = \frac{M \cdot y}{I} = 2,33 \cdot 10^7 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{x=3} = \frac{M \cdot y}{I} = 4,26 \cdot 10^7 \text{ Pa}$$

A seção crítica ocorre em $x = 3$, exatamente no rebaixo. Pelo rebaixo ser um concentrador de tensões é necessário corrigir a tensão teórica pelo fator de concentração de tensões K_f^M para que obtenhamos a tensão real.

Do livro do Shigley:

$$K_T^M = 1 + q \cdot (K_t^M - 1), \text{ onde para este caso } q \cong 0,55 \text{ e } K_t^M \cong 1,95$$

$$K_f^M = 1,52$$

Então a tensão real é $\sigma_{x=3}^{real} = 4,26 \cdot 10^7 \cdot 1,52 = 6,48 \cdot 10^7 Pa$. Neste elemento analisado tem-se o seguinte estado de tensões:

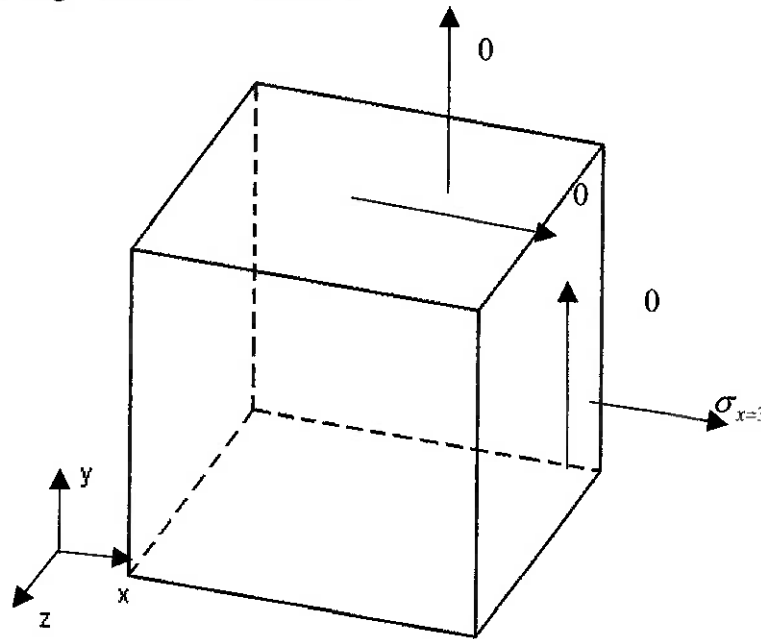


Figura 70: Estado de tensões

Como neste elemento analisado age apenas esta tensão, esta já é uma das tensões principais, portanto pelo critério de Von Mises tem-se que:

$$\sigma' = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_1 + \sigma_2^2} = 4,68 \cdot 10^7 Pa$$

As tensões de escoamento do aço e do alumínio são:

$$S_y^{aço} = 3,5 \cdot 10^8 Pa$$

$$S_y^{alumínio} = 2,7 \cdot 10^7 Pa$$

Apenas comparando a tensão equivalente com os limites de escoamento pode-se notar que apenas o eixo de aço resistirá à solicitação sem escoar, pois $S_y^{alumínio} < \sigma'$ mostra que o alumínio sofre escoamento.

O fator de segurança para o eixo de aço é de:

$$\eta = \frac{S_y}{\sigma'} = 5,4$$

Como o coeficiente de segurança é grande e para tentar aliviar a massa do robô a análise será repetida com um eixo tubular de mesmo diâmetro externo.

Os novos cálculos levam a um coeficiente de segurança de $\eta = 4,5$, como este coeficiente praticamente não diminuiu devido o furo ser bem pequeno, apenas 6,36 mm de diâmetro, optou-se pelo eixo vazado.

3.5.2. Geometria proposta da peça

Partindo-se de um vergalhão comercial de $\frac{1}{2}$ polegada (12,7 mm), as extremidades do mesmo serão torneadas até o diâmetro de 10mm, a fim de alojarem as polias e seus rolamentos. A figura abaixo ilustra a geometria da peça.

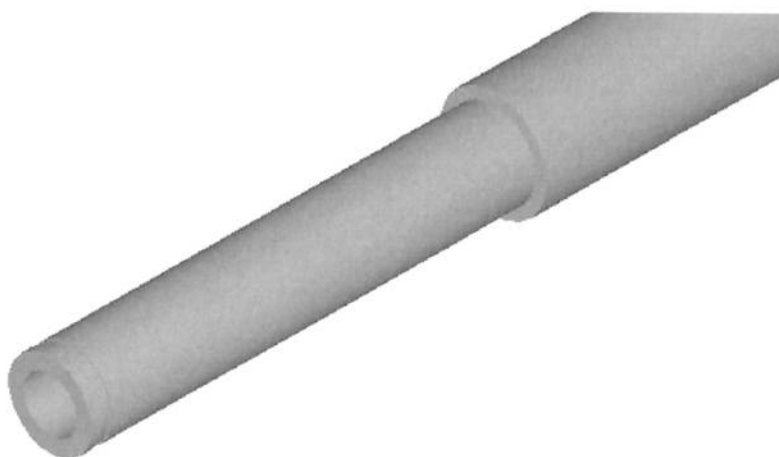


Figura 71: Eixo traseiro em detalhe(1)

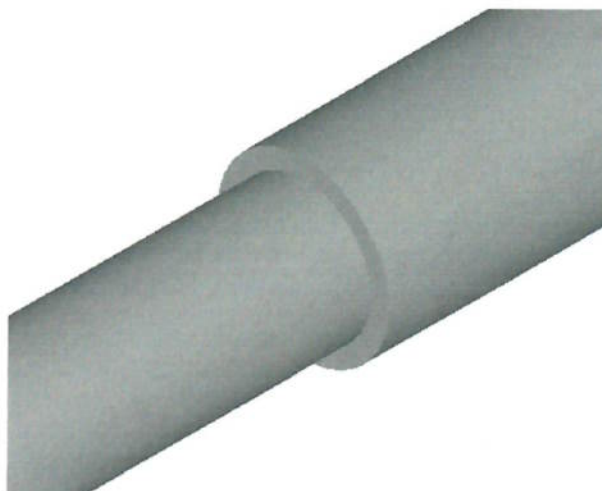


Figura 72: Eixo traseiro em detalhe (2)

Para a fixação das polias no eixo, foram projetados ressaltos, para segurá-las internamente, e externamente serão utilizados anéis elásticos. Observar desenho abaixo:

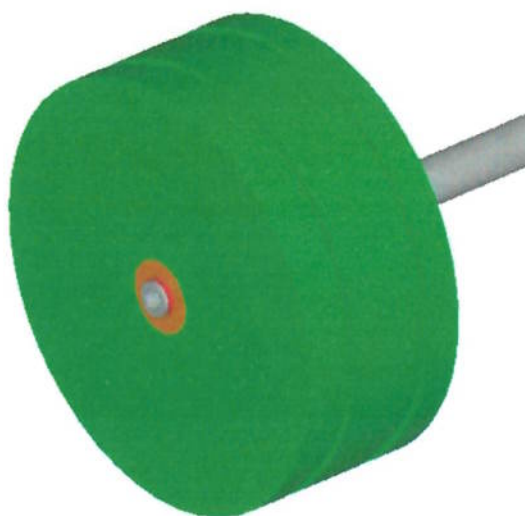


Figura 73: Polia montada no eixo traseiro

3.5.3. Análise por elementos finitos

Utilizando-se o programa de elementos finitos Cosmos Design Star, modelou-se o eixo traseiro como um tubo circular, de seção variável (diâmetro 10mm nas pontas e diâmetro 12,7mm no centro).

Os carregamentos foram os mesmos da análise inicial, ou seja, 75 N na direção vertical para cima e 149,6 N na direção longitudinal do carrinho.

Nesta análise o eixo a ser modelado é o eixo tubular, já que este foi o escolhido.

O material utilizado para a modelagem foi o aço ABNT1020.

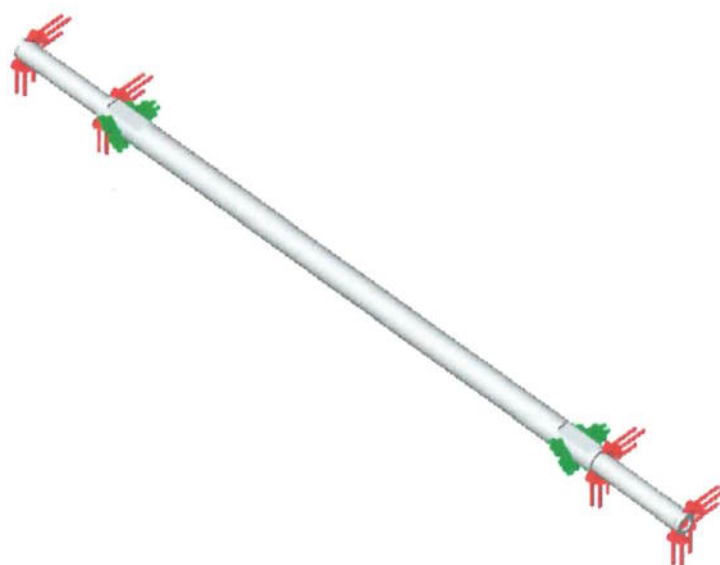


Figura 74: Modelo importado no programa

Eixo traseiro-Deformaes Static Nodal Stress
Units: N/m² Deformation Scale: 1:1

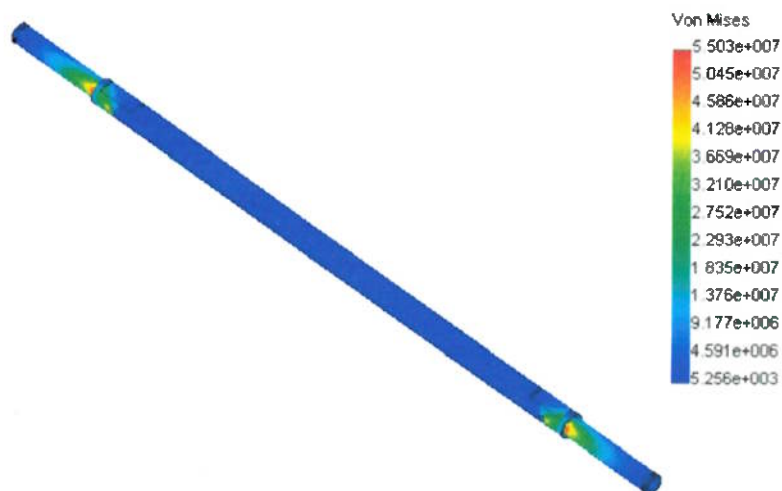


Figura 75: Distribuição das tensões de Von Mises

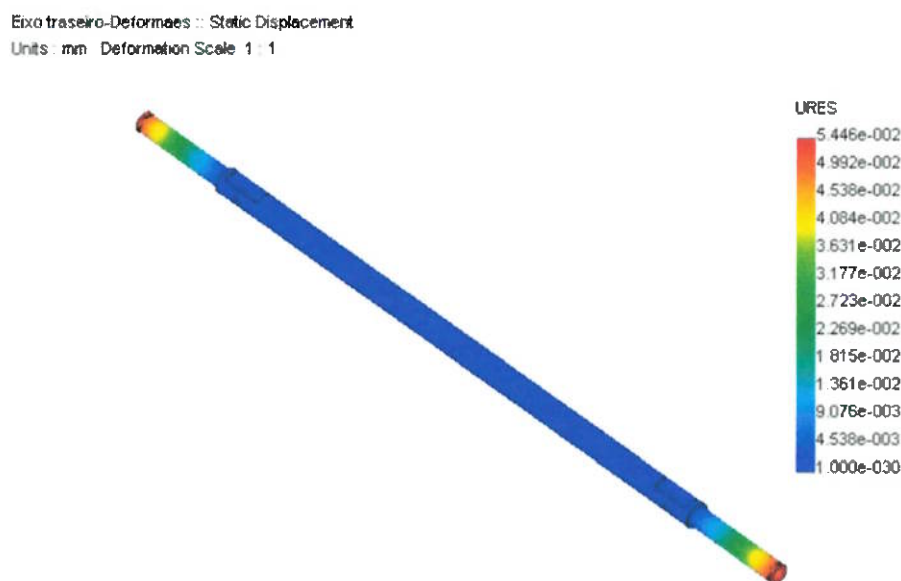


Figura 76: Deslocamento resultante

A partir das simulações observa-se que a máxima tensão de Von Mises está condizente com o resultado do cálculo manual. Nota-se também que o deslocamento da ponta do eixo é de apenas 0,05 mm, o que não compromete o alinhamento do conjunto e a conseqüente perda de posicionamento da correia.

O fator de segurança fornecido pelo programa é de 6,389, que também é um valor próximo ao do cálculo manual.

3.5.4. Projeto do mancal traseiro

Para o projeto do mancal traseiro o ponto mais importante foi a tentativa de criar uma peça que permitisse a fácil montagem das esteiras do robô e também permitisse o ajuste longitudinal do eixo do robô.

A partir destas necessidades surgiram duas soluções:

A primeira foi o uso de um bloco que deve ser montado no eixo antes da montagem das polias e este bloco seria posicionado com parafusos em alguns dos diversos furos na base do robô. Esta alternativa foi descartada pela dificuldade na montagem.

A outra solução encontrada é a mostrada na Figura 77 e esta foi a adotada por ser de fácil construção e também por permitir um fácil ajuste da posição do eixo, pois para isso basta apenas apertar o parafuso localizado em sua parte posterior que o eixo será puxado para trás esticando-se a correia.

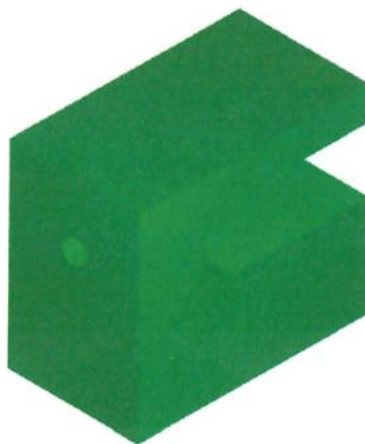


Figura 77: Mancal traseiro

3.5.5. Análise por Elementos Finitos

Para a validação desta peça inicialmente tentou-se criar um modelo simplificado dessa peça de forma a poder-se calcular manualmente os pontos críticos, mas após os cálculos observou-se que esta aproximação não gerou resultados próximos dos da simulação, porque para o cálculo manual o fator de segurança obtido foi bem maior que o observado na simulação. Após uma breve análise a origem dessa diferença foi encontrada. Nos cálculos manuais utilizou-se apenas a teoria de resistência dos materiais e esta não é válida para as regiões nas proximidades de cargas concentradas, exatamente onde a simulação mostrou ocorrer a tensão mais alta, para a resolução deste problema seria necessário o uso de alguma teoria mais elaborada como a teoria da elasticidade, portanto apenas os resultados das simulações serão mostrados.

O material utilizado na modelagem da peça é o alumínio e o carregamento é similar ao do eixo, ou seja, foram aplicados 75 N na vertical para cima na face superior da peça e 149,6 N na direção horizontal no ressalto da parte de trás onde

ficará apoiada a cabeça do parafuso. Os resultado da simulação com o programa Cosmos Design Star estão a seguir:

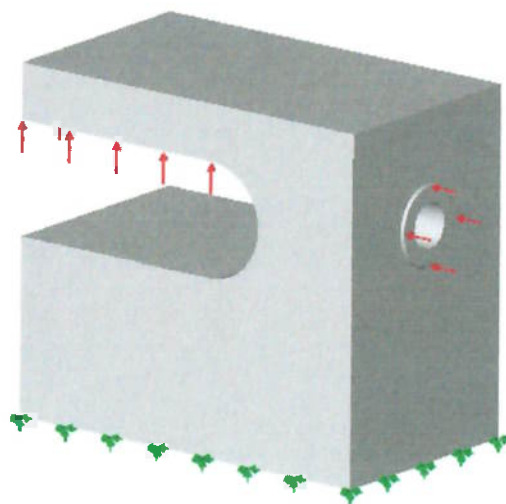


Figura 78: Modelo utilizado

Este modelo possui um ressalto em torno do furo apenas para a aplicação da carga, porque o programa utilizado permite a aplicação de cargas apenas em faces, cantos e vértices.

estricador_v2*-Deformao Static Nodal Stress
Units: N/m² Deformation Scale: 1:1

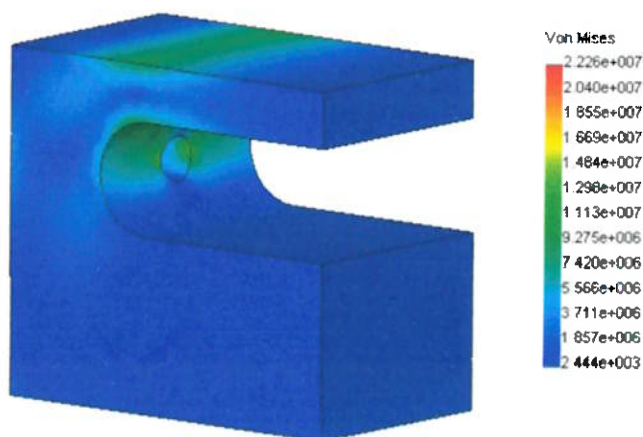


Figura 79: Tensões de Von Mises

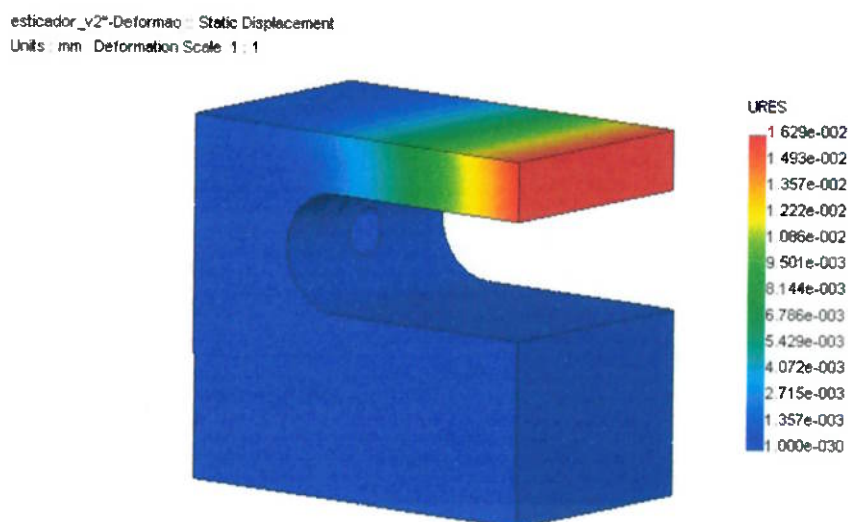


Figura 80: Deflexão resultante

A deflexão máxima da ponta da peça foi de apenas 0,016 mm e isto não afeta significativamente o posicionamento vertical do eixo. O coeficiente de segurança obtido foi de 1,24 o que parece razoável, porque a maior tensão ocorreu na região de aplicação da força.

3.6. Eixo dianteiro

3.6.1. Simulação do eixo

As simulações a seguir têm o objetivo de validar a escolha do diâmetro do eixo dianteiro.

O carregamento real mais severo encontrado é o que foi adotado para todas as simulações a seguir, e corresponde a um carregamento típico que ocorre quando o robô inicia a subida da escada, sendo que este fica suspenso apoiado apenas pelos braços e pelas rodas traseiras. Neste momento considera-se que atração fique distribuída igualmente entre as esteiras.

Em tal situação obtém-se as seguintes cargas já decompostas nas direções cartesianas:

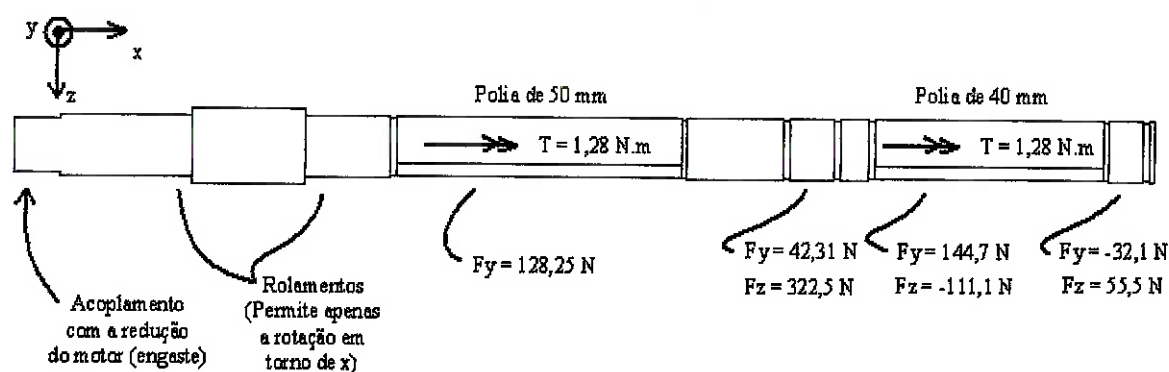


Figura 81: Carregamento do eixo dianteiro

O material utilizado no eixo será o aço ABNT 1020 para todos os casos. Em todos os casos a simulação será feita utilizando-se o programa Cosmos Design Star.

3.6.1.1. Eixo de 10 mm

Este é o eixo originalmente proposto pelo grupo, mas após esta análise foi possível observar que ele não resiste ao carregamento.

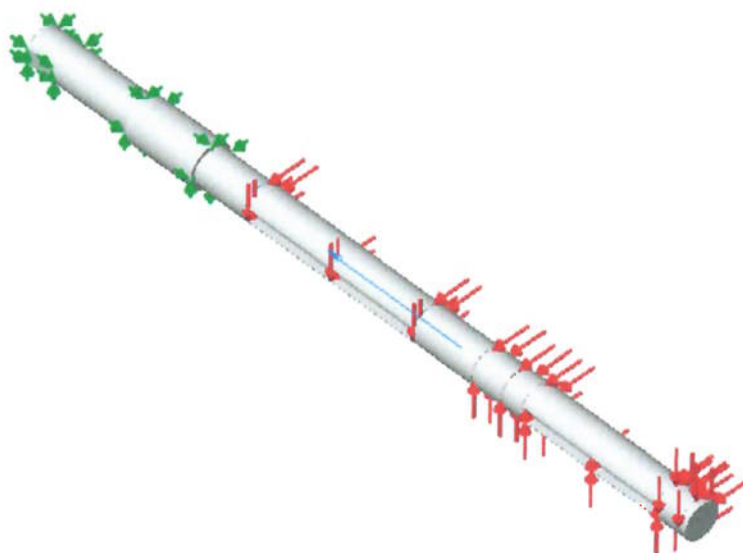


Figura 82: Modelo do primeiro eixo

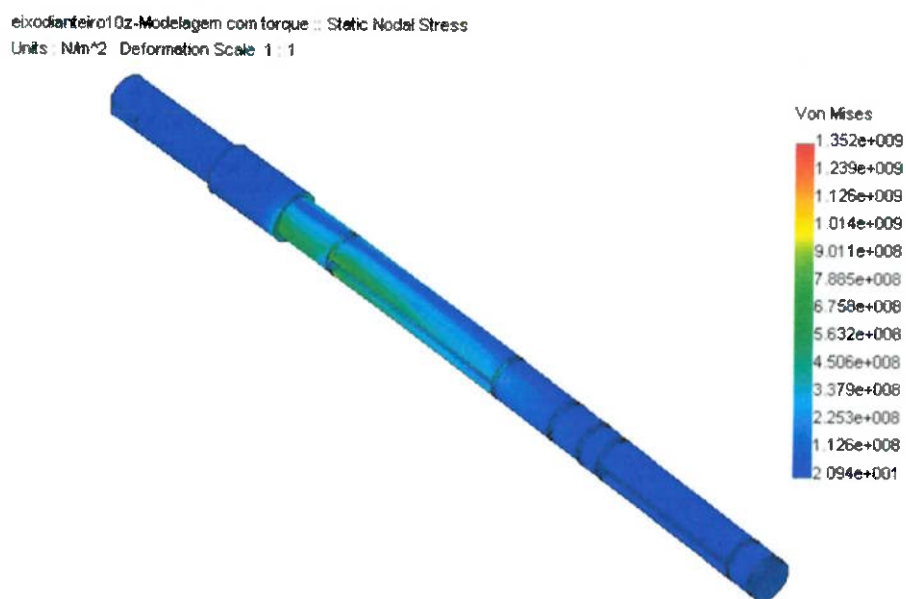


Figura 83: Tensões de Von Mises

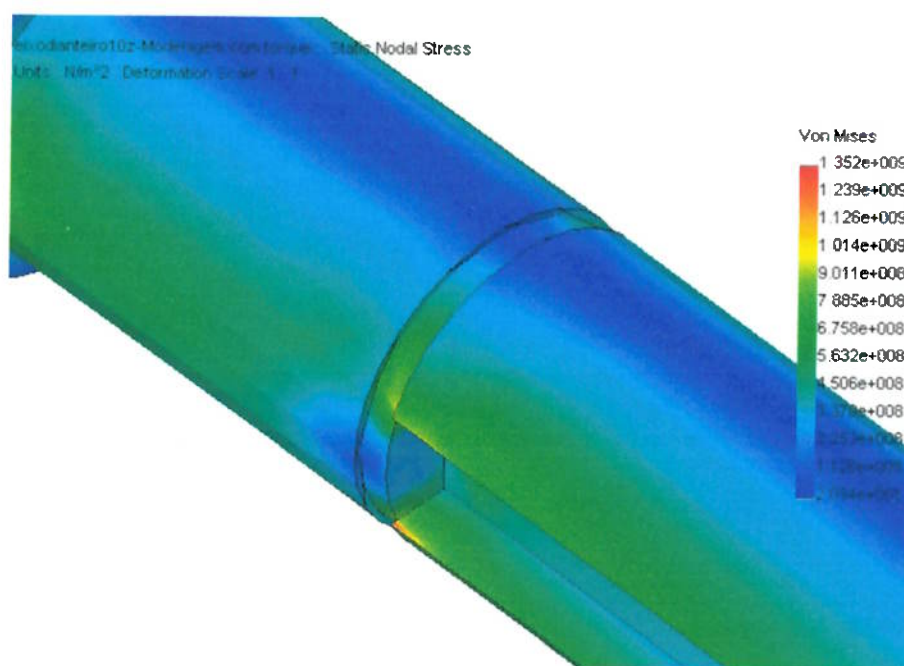


Figura 84: Detalhe da região de maior tensão

Apesar de não existir uma grande região vermelha em destaque observa-se pela legenda que a partir de aproximadamente a metade da região verde a tensão no eixo é superior à suportada pelo aço.

eixodianteiro10z-Modelagem com torque :: Static Displacement
Units: mm Deformation Scale: 1 : 1

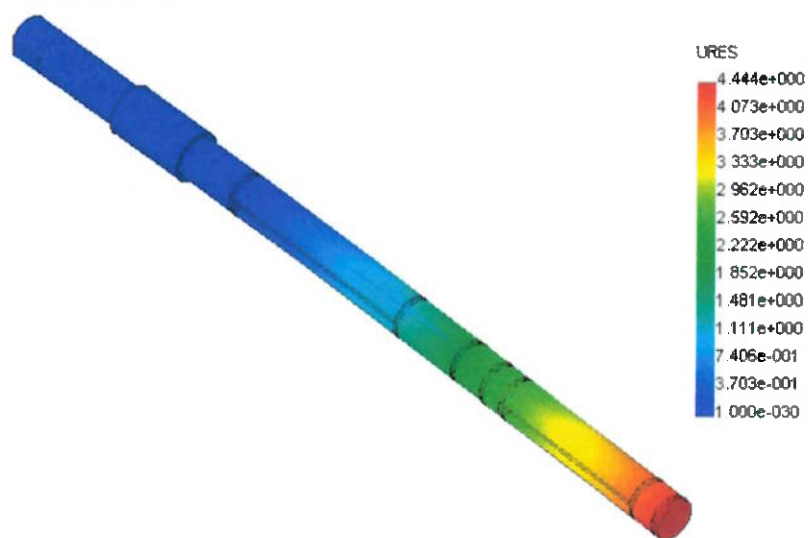


Figura 85: Deflexão do eixo

eixodianteiro10z-Modelagem com torque :: Design Check Criterion: Max von Mises Stress
Red < FOS = 1 < Blue Deformation Scale: 1 : 0

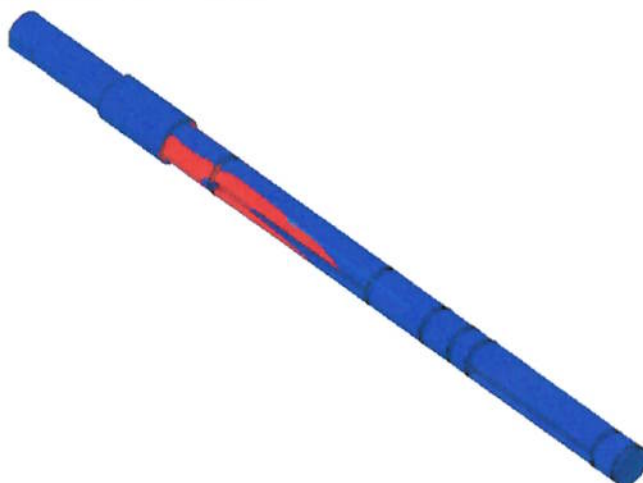


Figura 86: Pontos de escoamento

Por estes resultados observou-se que este eixo rompeu sendo, portanto, descartado. O local onde a tensão foi exageradamente grande e superou-se a tensão de ruptura é a região próxima do rasgo da chaveta.

3.6.1.2. Eixo de 10 mm com rasgo de chaveta arredondado

O segundo modelo tenta amenizar a concentração de tensões nas bordas da chaveta utilizando-se de rasgos de chavetas arredondados.

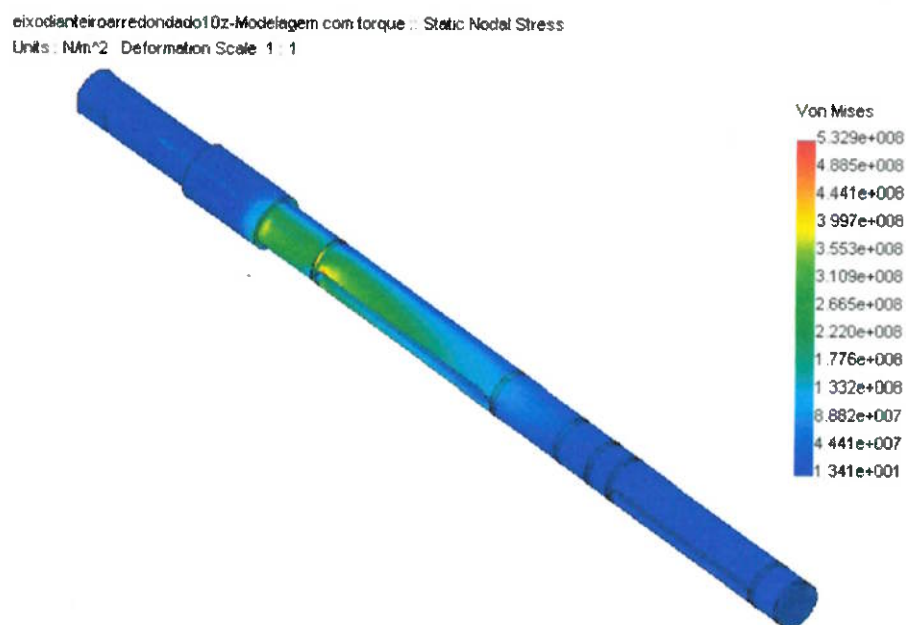


Figura 87: Distribuição das tensões de Von Mises

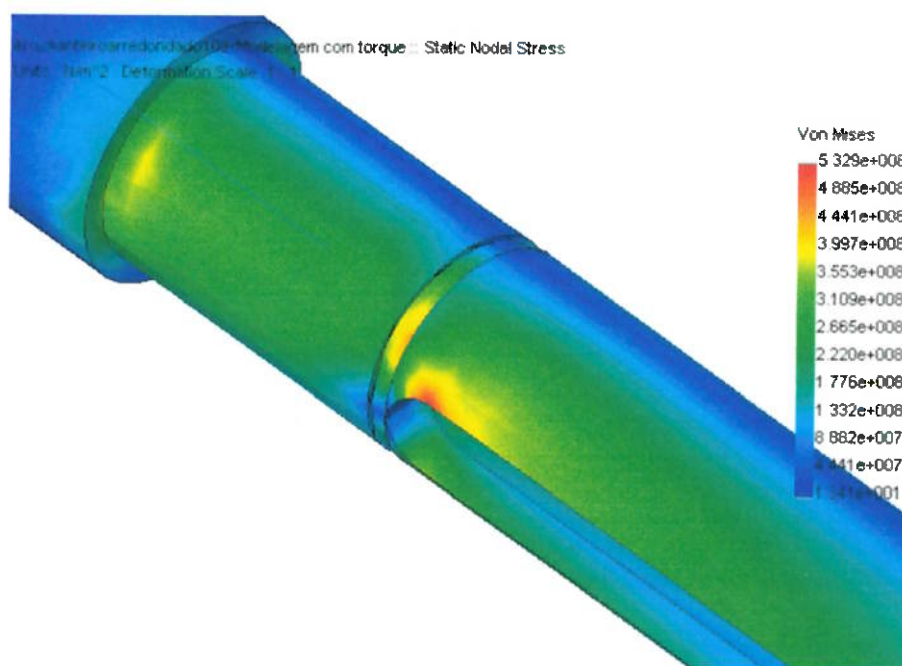


Figura 88: Detalhe da região de maior tensão

Analisando-se as tensões na região próxima à da borda da chaveta tem-se que houve uma grande diminuição das tensões atuantes indo de um máximo de $1,39e^{+9}$ Pa para $5,33e^{+8}$ Pa, porém essa redução ainda não foi o suficiente para evitar o escoamento do eixo.

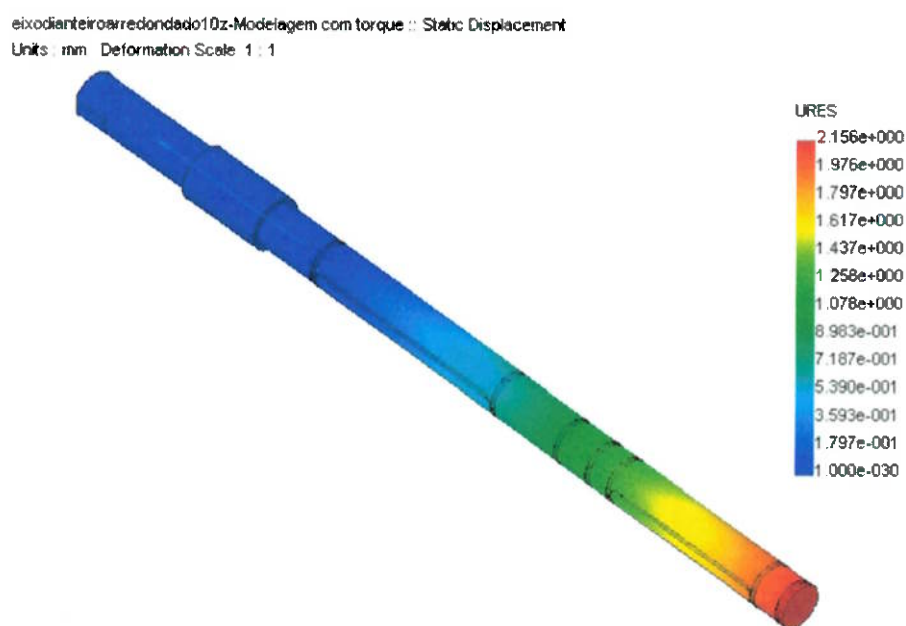


Figura 89: Deflexão do eixo



Figura 90: Pontos de escoamento

Neste segundo modelo uma região bem menor apresentou escoamento.

3.6.1.3. Eixo de 12 mm

Neste passo do projeto optou-se por fazer o eixo com diâmetro de 12 mm.

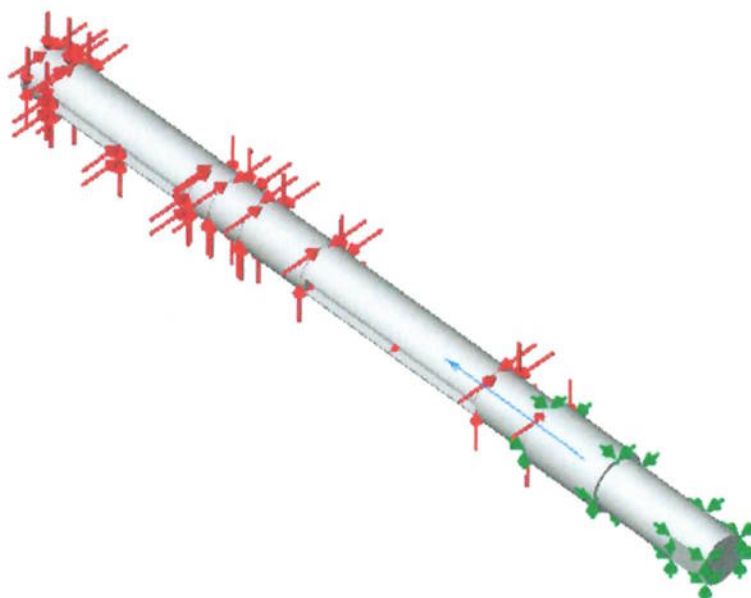


Figura 91: Modelo do terceiro eixo

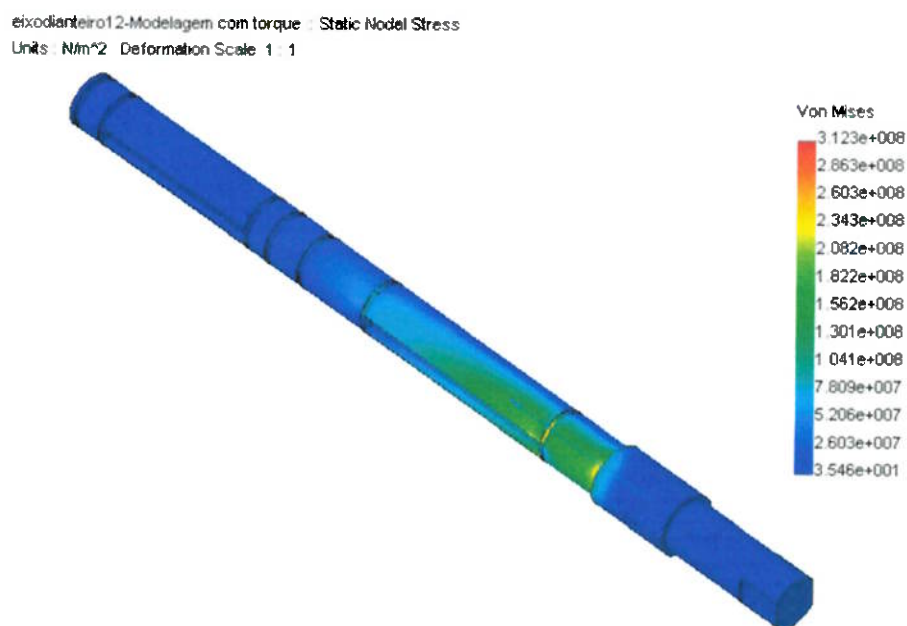


Figura 92: Distribuição das tensões de Von Mises

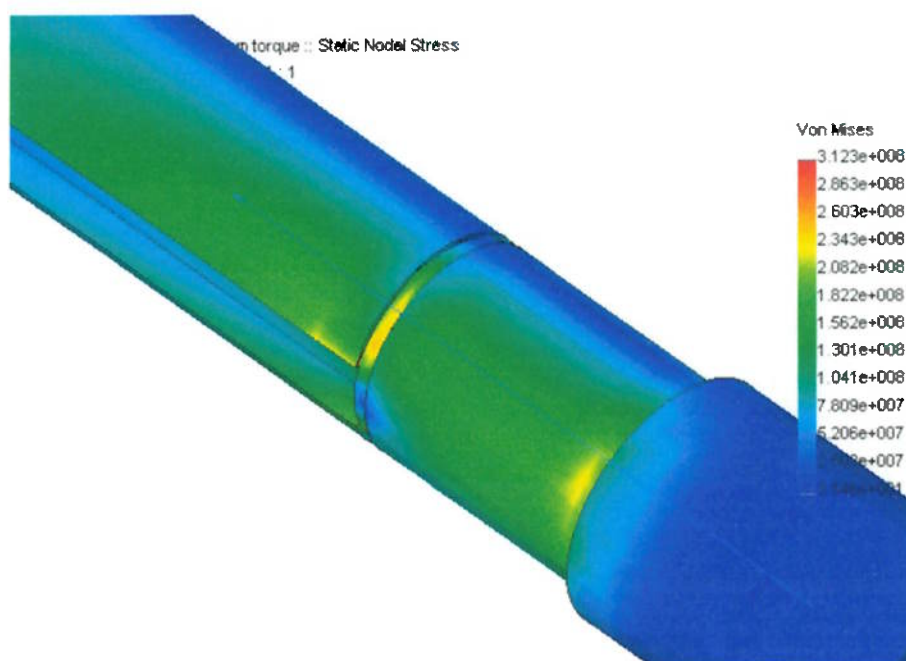


Figura 93: Detalhe da região de maior tensão

A análise da região crítica mostra que o aumento do diâmetro do eixo conseguiu reduzir a tensão da borda do rasgo da chaveta a um nível aceitável, portanto não houve escoamento e o eixo resistiu à solicitação.

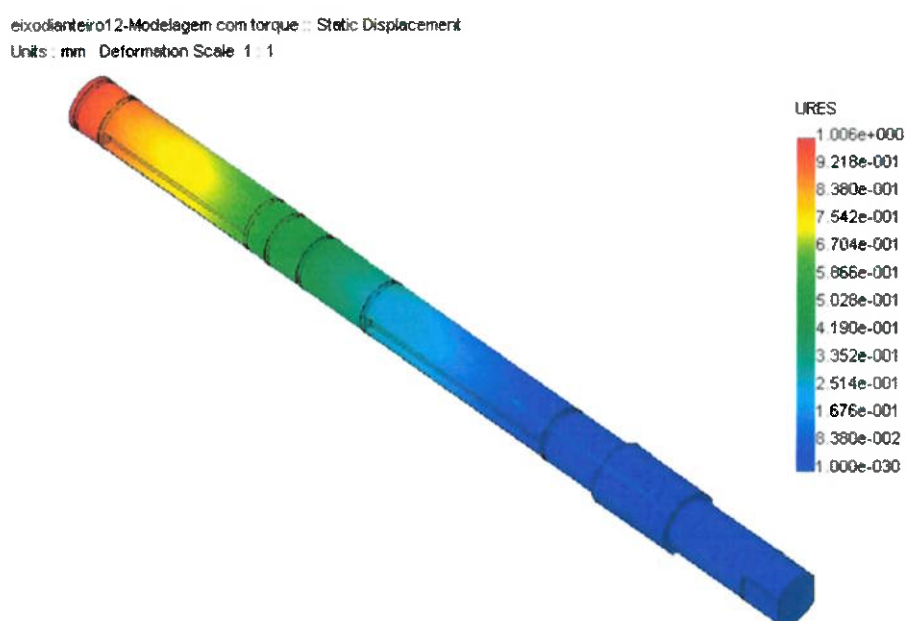


Figura 94: Deflexão do eixo

eixo12-Modelagem com torque :: Design Check Criterion: Max von Mises Stress
 Red < FOS = 1 < Blue Deformation Scale: 1 0



Figura 95: Pontos de escoamento

Apesar desta análise mostrar que o eixo resistiu ao carregamento com uma certa folga (fator de segurança de 1,13), o eixo escolhido será o de diâmetro 12 com rasgo de chaveta arredondado.

A simulação do eixo de diâmetro 12 com rasgo de chaveta arredondado não pode ser feita devido a problemas ocorridos na exportação do modelo, com este eixo o modelo importado sempre ficava quebrado em shells e com algumas faces a menos, portanto a seguir prosegue-se uma análise comparativa para justificar essa escolha.

Tabela 7: Evolução dos fatores de segurança

Eixo	Fator de segurança (com relação ao escoamento)	Melhora (%) 1º modelo / 2º modelo
Diâmetro 10 mm	0,2601	--- / ---
Diâmetro 10 mm rasgo arredondado	0,6598	253,7 / ---
Diâmetro 12 mm	1,126	432,9 / 170,7

A

Tabela 7 mostra a evolução da resistência dos eixos analisados, a partir dela pode-se concluir que a utilização de um rasgo arredondado, além de não introduzir dificuldades na fabricação tende a trazer uma melhora na resistência do eixo devido a diminuição da concentração de tensões nas bordas do rasgo de chaveta.

3.7. Guia da Esteira do Braço

O objetivo principal deste elemento é fornecer um apoio interno à correia de modo que ela não embarrigue para dentro ao entrar em contato com os degraus.

3.7.1. Diretrizes Gerais de Projeto

O que norteou o projeto das guias foi elas possuírem:

- Baixo custo de construção;
- Facilidade de construção;
- Capacidade de sustentar a esteira;
- Baixo peso, a fim de diminuir o peso global do equipamento;
- Baixo coeficiente de atrito com borracha, a fim de não acarretar em tantas perdas dissipativas.

3.7.2. Descrição das soluções encontradas

- Guia com roletes: é uma solução na qual existe um suporte trapezoidal onde são fixados vários roletes;
- Guia com roletes articulados: solução parecida com a guia com roletes diferindo apenas na ligação destes com o suporte. Para realizar a ligação dos roletes com o suporte são utilizados balancins triangulares, uma extremidade fica fixada no suporte e nas outras duas pontas tem-se roletes, esta montagem permite o movimento relativo entre os roletes, permitindo-se assim um melhor contato com o degrau;

- Guia de teflon: é composta por uma barra maciça de teflon fixada diretamente no suporte;
- Guia de teflon articulado: alternativa similar à guia com roletes articulados, na qual os roletes são substituídos por pequenas barras de teflon;
- Guia de teflon fixada por uma mola em lâmina: opção onde a ligação entre o suporte e a barra de teflon é feita por meio de um elemento elástico.

Tabela 8: Tabela de decisão

Critério (peso)	Guia com roletes		Guia com roletes articulados		Guia de teflon		Guia de teflon articulado		Guia de teflon + mola em lâmina	
	Nota	Total	Nota	Total	Nota	Total	Nota	Total	Nota	Total
Custo de construção (1)	1	1	1	1	4	4	2	2	3	3
Facilidade de construção (3)	3	9	2	6	5	15	2	6	4	12
Sustentação da esteira (1)	5	5	5	5	5	5	5	5	3	3
Massa (2)	3	6	4	8	4	8	4	8	5	10
Baixo atrito (2)	5	10	5	10	2	4	3	6	2	4
Total	31		30		36		27		32	

Obs.: as notas dadas variam de 1 a 5.

A partir da tabela de decisão optou-se pela construção da guia feita com uma pastilha de teflon presa ao suporte.

3.7.3. Detalhamento da solução escolhida

A solução escolhida será composta por duas peças, uma o tarugo de teflon e outra o suporte trapezoidal, ambos serão unidos por meio de parafusos.

A pastilha de teflon terá uma largura de 18 mm de forma a se encaixar entre os ressaltos da correia e o suporte terá uma espessura de 10 mm, largura apenas suficiente para garantir uma boa fixação do tarugo de teflon.

O resultado da montagem será o mostrado na Figura 96.



Figura 96: Guia da correia do braço



Figura 97: Guia sendo montada no braço

3.8. Atuadores

3.8.1. Locomoção

Para a locomoção do robô, havia algumas alternativas de atuadores para se utilizar: motores elétricos CC, motores de passo ou mesmo motores sem escovas (brushless). Os motores brushless apresentam como principais vantagens:

- Compacto e eficiente, apresentando rendimentos superiores a 98%;
- Alta performance;
- Longa vida útil - limitada somente pela vida dos rolamentos;
- Segurança para o meio ambiente - sem faíscas de comutação;
- Mínima inércia do rotor - aceleração e frenagem rápidas.

Mas o grande problema deste tipo de motor é o alto custo, que o inviabiliza em muitas aplicações, e este foi o caso, uma vez que apresentam custos incompatíveis com o orçamento disponível para o projeto.

Os motores de passo também foram considerados para essa aplicação, uma vez que possuíam características importantes, tais como a possibilidade de controle em malha aberta. Foram descartados do projeto por possuírem elevado peso e alto consumo de energia.

Assim, restou-nos utilizar motores de corrente contínua com escovas, uma vez que permitem uma grande redução nos custos, bem como economia de peso.

3.8.1.1. Dimensionamento dos motores

O dimensionamento dos motores foi efetuado com bases em requisitos de projeto bem como a disponibilidade de equipamentos no mercado.

Requisitos:

- Velocidade de trabalho em torno de 0,5 m/s;
- Aceleração desejada: 0,25 m/s²;
- Inclinação máxima permitida: 33°.

Com base nesses requisitos, pode-se extrair a rotação necessária a ser imposta à polia. Como $v = \varpi \cdot r$, e $r = 0,06\text{m}$, obtém-se $\varpi = 8,33 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$ e a rotação de saída será de 79,55 rpm.

Algumas hipóteses foram formuladas a fim de garantir o correto funcionamento do equipamento quando o mesmo for solicitado de maneira mais severa, sendo elas descritas abaixo:

Todo o peso do equipamento está sendo movido por apenas um dos motores, o que simula uma condição onde uma das esteiras perde contato com o solo e a transmissão de potência ao solo fica restrita apenas à outra esteira.

A figura abaixo tem por objetivo mostrar as forças atuantes no sistema constituído pelo robô.

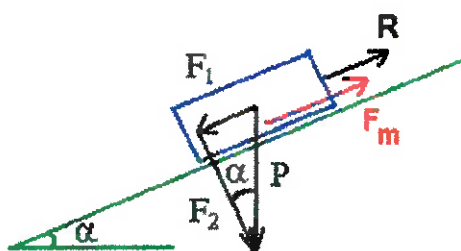


Figura 98: Forças atuantes

Em que:

P = força peso (=150N)

R = força resultante

F_1 = componente da força peso na direção do movimento (=81,7N)

F_2 = componente da força peso na direção perpendicular ao movimento

F_m = força necessária para a movimentação do robô

Sabendo que $R = m.a \Rightarrow R = 15.0,25 = 3,75N$ obtemos o seguinte valor para a força F_m :

$$R = F_m - F_l \Rightarrow F_m = 85,5N$$

A determinação do torque necessário foi feita com base na força F_m bem como no raio da polia utilizada.

$$T = F_m . r_{polia} \Rightarrow T = 85,5.0,06 = 5,13N.m$$

Logo, o conjunto motorreductor deve possuir as seguintes características:

Torque de acionamento: 5,13 N.m

Rotação após o reductor: aproximadamente 80 rpm

Assim, uma excelente opção existente no mercado nacional é o motorreductor do tipo FPG, fabricado pela Bosch, que atende aos requisitos de torque e potência, e está ilustrado abaixo:

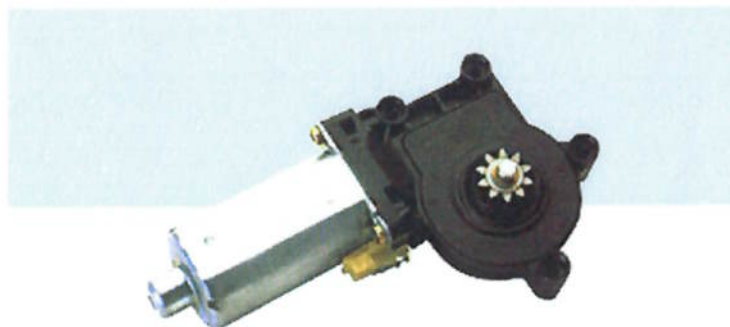


Figura 99: Motorreductor FPG

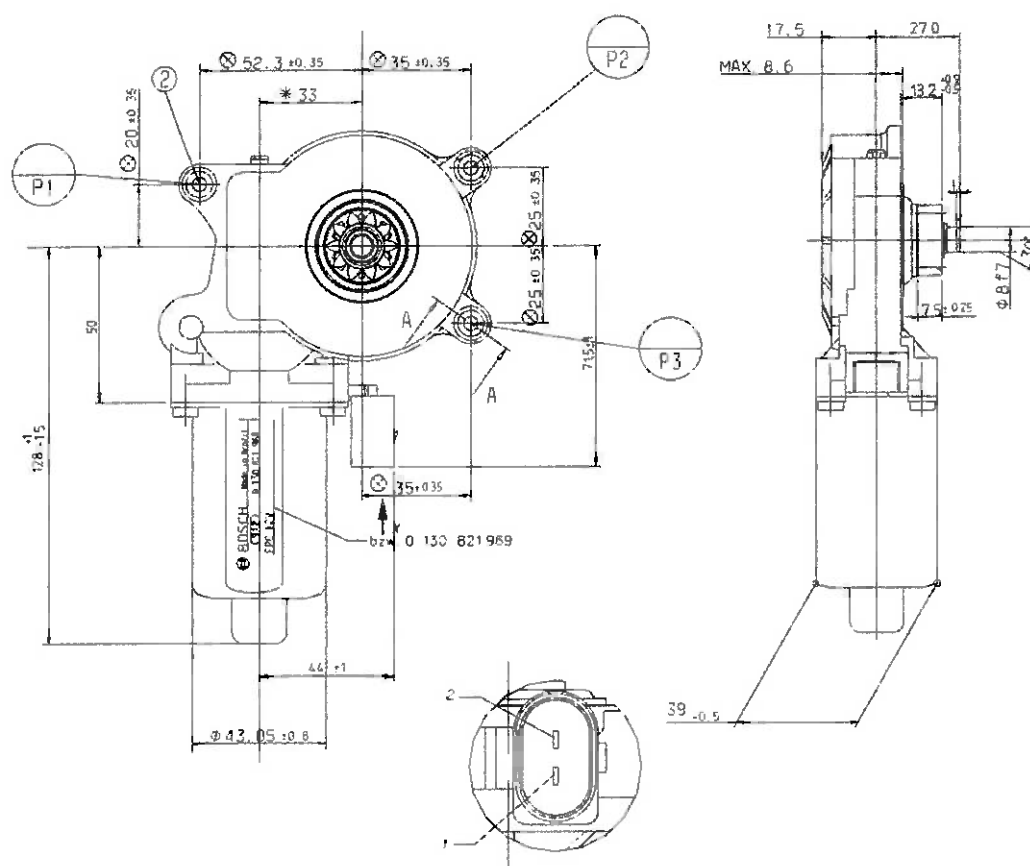


Figura 100: Desenho do motorreductor FPG

3.8.2. Articulação do Braço

Para a realização do movimento de articulação do braço, também será utilizado o mesmo motorreductor FPG descrito anteriormente, mas desta vez acoplado a uma transmissão especialmente projetada para fornecer alto torque de saída e baixa rotação (descrita no item 3.3.4.2).

3.9. Modelo CAD final

Ao longo da esta de projeto, utilizou-se exaustivamente o CAD Microstation J, da Bentley Systems. Com ele, foi possível melhorar as estimativas de peso das peças, bem como analisar possíveis interferências entre peças do robô. Para isso, um modelo sólido tridimensional do robô foi construído antes do início da construção do mesmo.

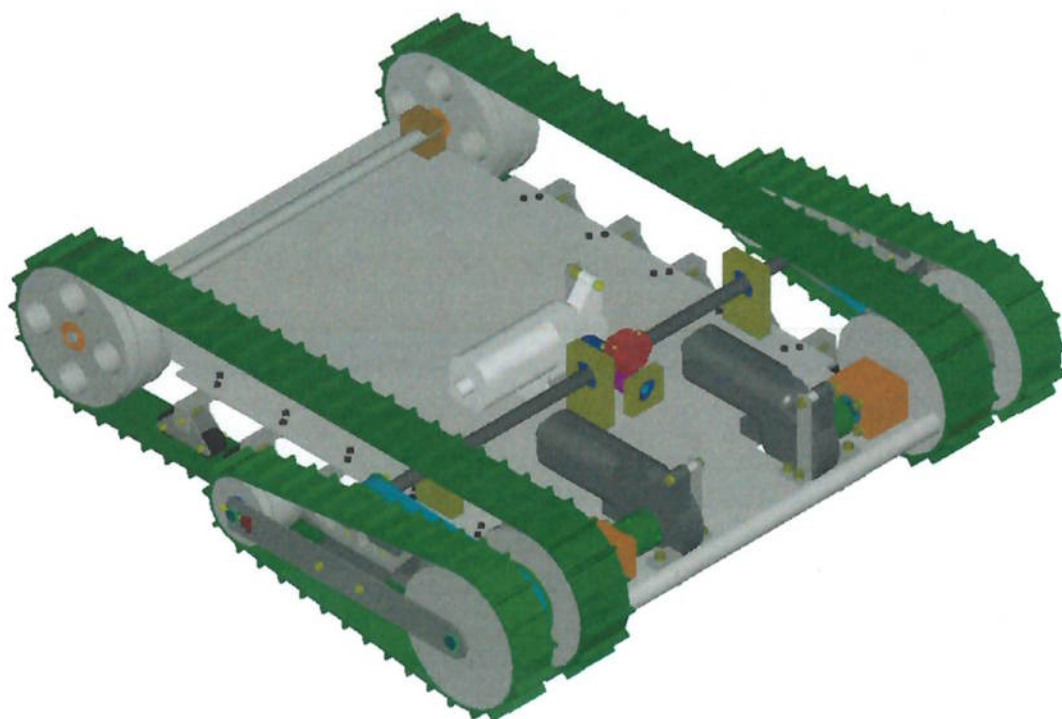


Figura 101: Modelo sólido do robô (1)

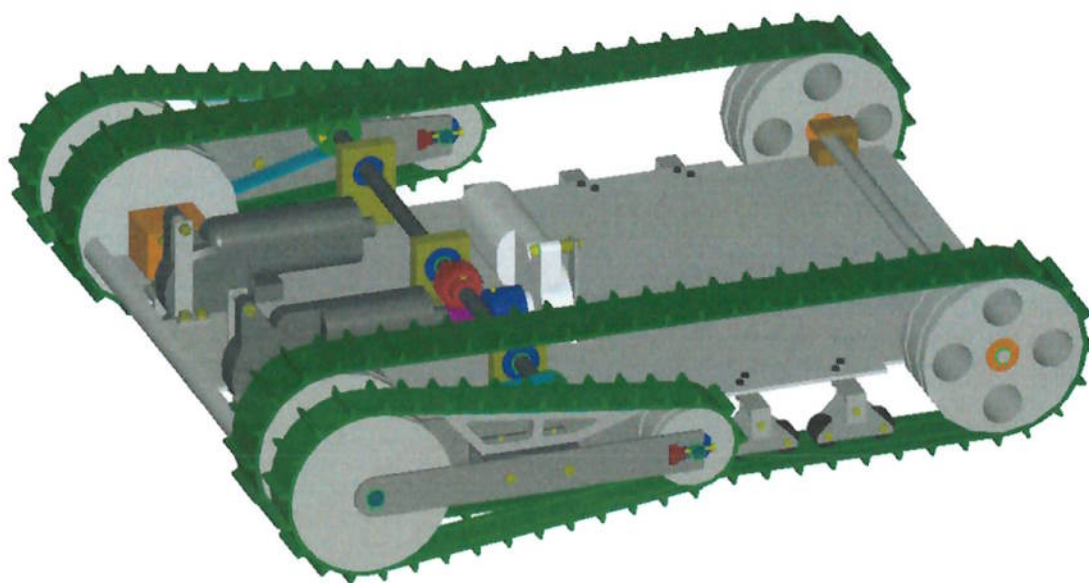


Figura 102: Modelo sólido do robô (2)

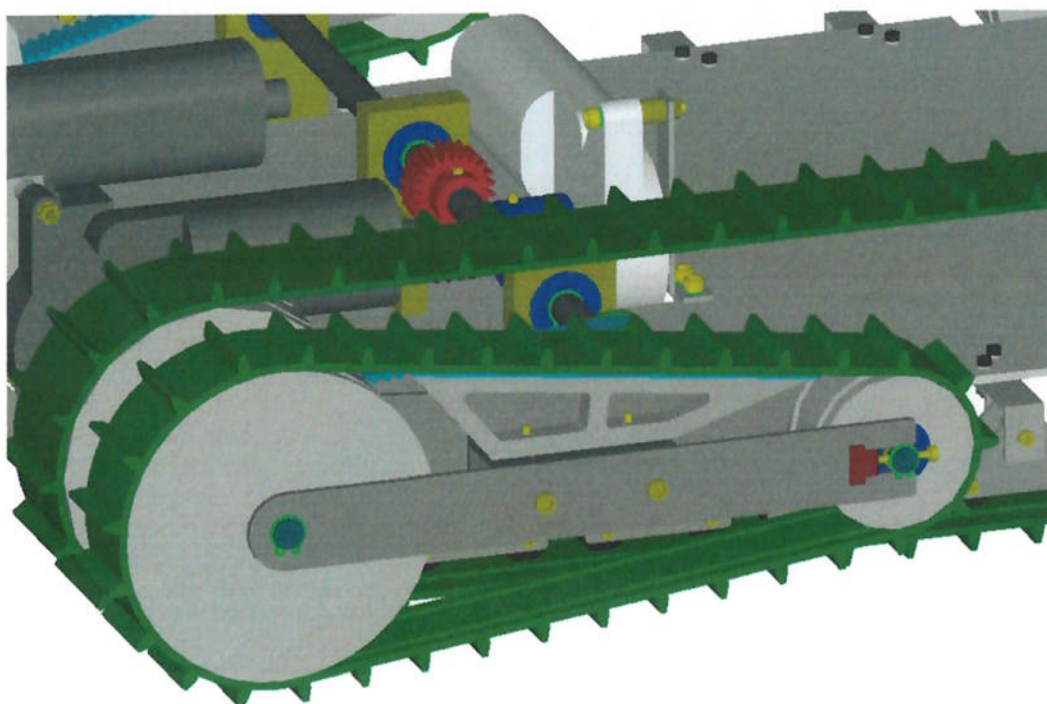


Figura 103: Modelo sólido do robô - detalhe do braço

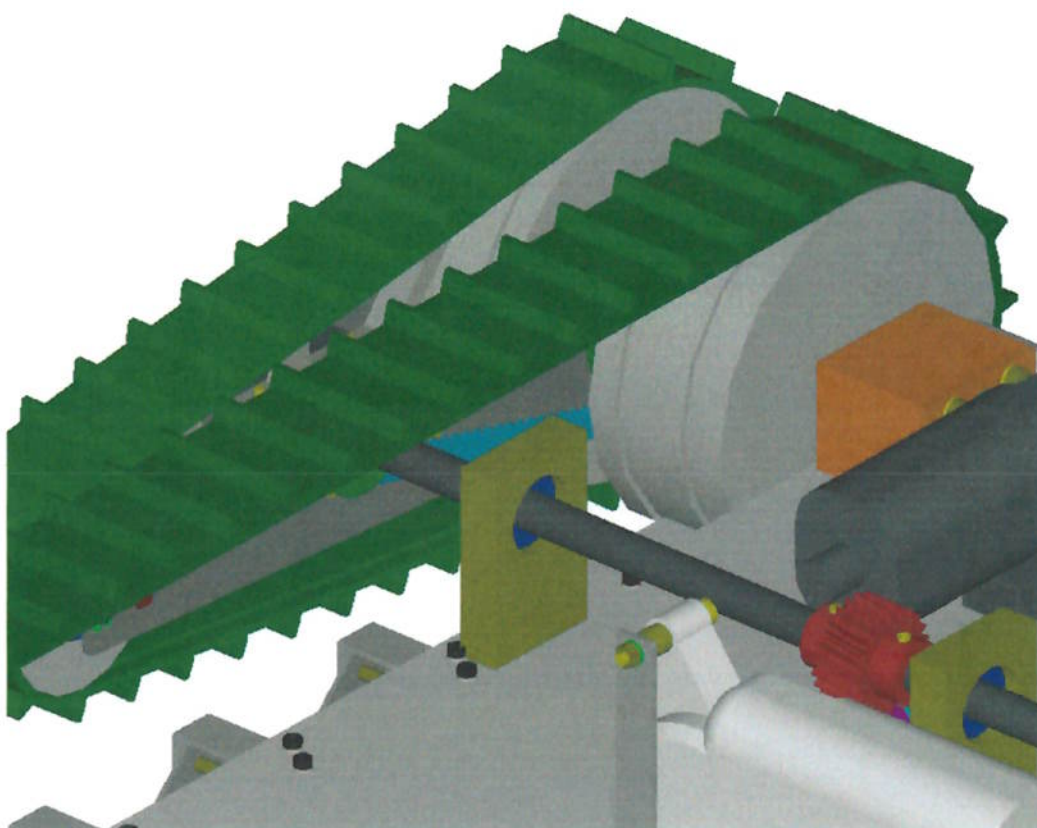


Figura 104: Modelo sólido do robô (4) - detalhe do mecanismo de acionamento do braço

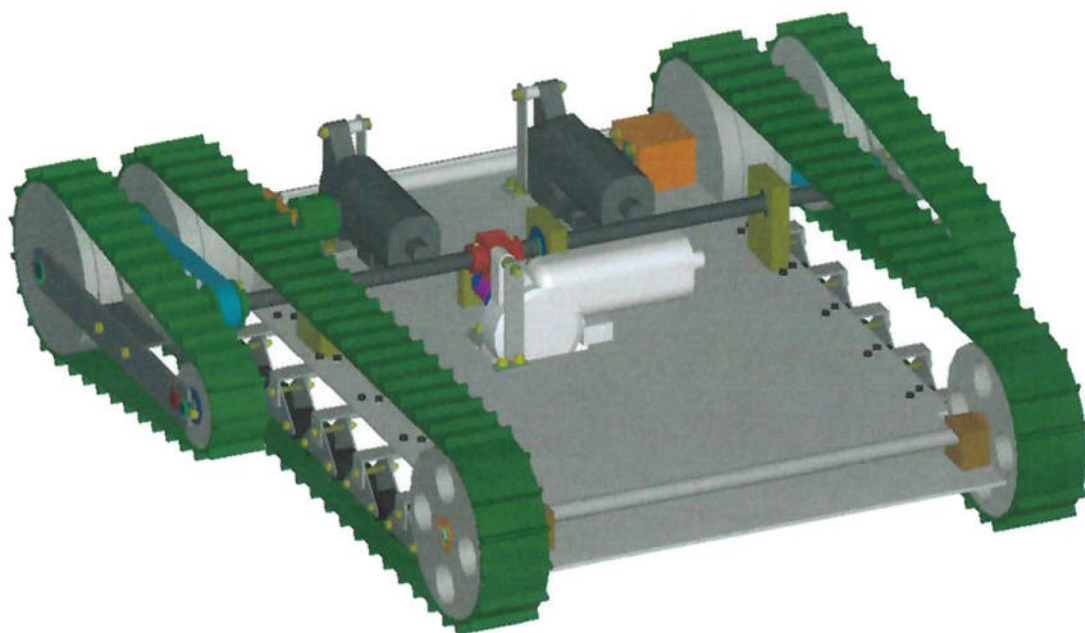


Figura 105: Modelo sólido do robô (5)

3.10. Montagem e ajustes

Após a construção e compra das peças necessárias à montagem do robô, procedeu-se à montagem do protótipo. Alguns pontos importantes devem ser destacados nesta fase.

- Como era de se esperar, algumas tolerâncias são difíceis de ser atingidas com as máquinas disponíveis na oficina do PMR;
- A montagem das peças onde as folgas eram reduzidas ou havia interferência (eixos, alojamentos de rolamento etc), não é uma tarefa simples e exige cuidado, principalmente a montagem dos rolamentos nos respectivos alojamentos e eixos, pois é possível danificar os rolamentos caso se exerça muita força no processo (o que pode causar folga no rolamento, reduzindo sua vida útil ou mesmo impedir o livre giro do mesmo);
- Por se tratar de um protótipo, muitas das peças inicialmente fabricadas tiveram que sofrer pequenos ajustes para que fosse possível uma montagem consistente;
- Dificuldades adicionais foram causadas por falta de ferramentas adequadas;

De modo geral, o processo de montagem do protótipo consumiu mais tempo do que o inicialmente previsto, devido às dificuldades acima citadas e também a alguns pontos que serão detalhados na sequência.

a) Comprimento de uma das esteiras maior que a outra

Uma das esteiras fabricadas possuía comprimento cerca de 8 mm maior que a outra. Embora uma pequena variação no comprimento das esteiras tenha sido previsto no projeto, uma diferença desta magnitude teve de ser corrigida deslocando-se o conjunto motor e eixo dianteiro em direção à frente do robô, para evitar que houvesse um significativo desalinhamento no eixo traseiro, o que comprometeria o posicionamento relativo entre as polias dianteiras e traseiras (as mesmas devem ficar paralelas, para que a correia não saltasse para em direção à parte de fora).

Foi difícil conseguir fazer o protótipo operar nesta condição, pois também exigiu que o eixo responsável pela transmissão de torque para a articulação do braço também fosse deslocado angularmente.

b) Correias com pequenas ondulações

Por se tratar de um componente especialmente desenvolvido, o processo de fabricação das esteiras fez com que a peça final não tivesse as características ideais, apresentando pequenas ondulações ao longo de sua extensão, o que muitas vezes fazia com que a esteira saltasse fora das polias. Isso mostra que o processo de fabricação deste componente precisaria sofrer melhorias, a fim de garantir um melhor desempenho em serviço para o equipamento.



Figura 106: Ondulações na esteira

c) Dificuldade de se conseguir o alinhamento desejado para os acoplamentos dos motores

O tipo de construção adotada para o robô, fez com que fosse difícil conseguir um correto alinhamento entre o eixo de saída do motorreductor e o eixo responsável pela transmissão do torque às polias.

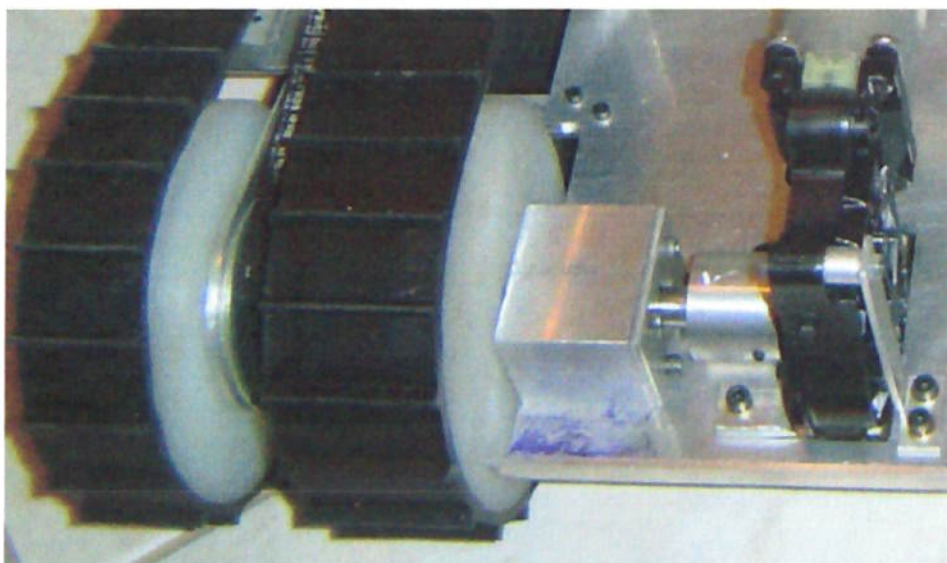


Figura 107: Acoplamento dianteiro

d) Confeção errônea de peças

Ao longo do projeto, algumas peças foram feitas de maneira errada, o que causou maior atraso ainda. O exemplo maior disso foi a confecção do par sem fim utilizado

na articulação do braço. Esta peça foi inicialmente fabricada por uma empresa, mas de maneira completamente equivocada: sequer foi utilizada fresa módulo para a abertura dos dentes da engrenagem, o que inviabilizou completamente o seu uso.

E) ESTEIRA DO BRAÇO MENOR QUE O ESPECIFICADO

A confecção das esteiras do braço também apresentou problemas: o número de dentes especificado não foi atendido, o que causou sérios problemas na montagem do braço.



Figura 108: Braço dianteiro

Esta situação obrigou uma alteração de última hora no projeto, que foi o encurtamento do braço em torno de 15mm. Por sorte, havia margem de manobra para que essa alteração fosse feita sem complicações a outros componentes, senão as chapas externas que tiveram o rasgo aumentado.

4. ELETRÔNICA DE POTÊNCIA E COMANDO

4.1. Descrição geral do sistema

O sistema elétrico é responsável pelo controle de todo o protótipo. Neste sistema o usuário aciona o joystick, que é responsável por enviar os sinais para a lógica de acionamento, que comanda a eletrônica de potência, esta por sua vez, comanda os motores para tração e movimentação do braço. O operador, através da visão, observa a movimentação do robô e realimenta o sistema através do joystick. O diagrama de blocos deste sistema está representado na Figura 109.

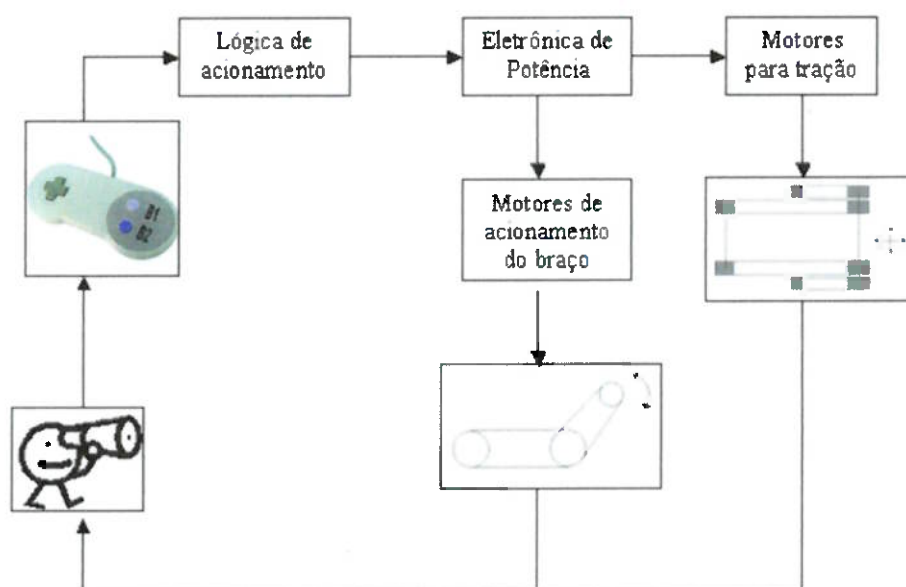


Figura 109: Diagrama de blocos do sistema elétrico

4.2. Lógica de acionamento dos motores para tração

A locomoção do veículo é feita através do acionamento de dois motores conforme ilustrado na Figura 110. A lógica do acionamento deve prever algumas condições:

- Quando acionado, através do joystick, para frente, a lógica deve acionar os dois motores;

- Quando acionado, através do joystick, para trás, a lógica deve acionar os dois motores no sentido reverso;
- Quando acionado, através do joystick, para a direita, a lógica deve acionar o motor 1 e o motor 2 no sentido reverso;
- Quando acionado, através do joystick, para a esquerda, a lógica deve acionar o motor 1 no sentido reverso e o motor 2;
- Quando acionado, através do joystick, dois sentidos quaisquer, a lógica não deve acionar nenhum dos dois motores.

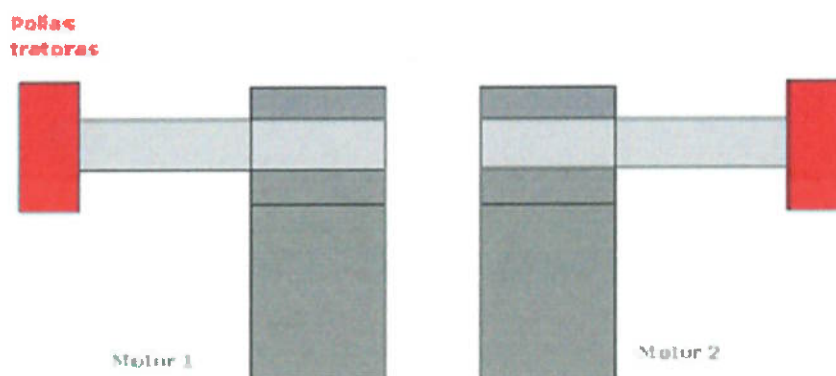


Figura 110: Disposição dos motores

A partir das condições acima, construiu-se a tabela ilustrada na Tabela 9.

Tabela 9: Tabela da verdade para acionamentos

Frente	Trás	Direita	Esquerda	Motor 1	Motor 2	Motor 1 REV	Motor 2 REV
1	0	0	0	1	1	0	0
0	1	0	0	0	0	1	1
0	0	1	0	1	0	0	1
0	0	0	1	0	1	1	0
1	1	X	X	0	0	0	0
1	X	1	X	0	0	0	0
X	1	1	X	0	0	0	0
X	X	1	1	0	0	0	0

Dispondo da Tabela 9, pode-se construir os mapas de Karnaugh para os motores nos dois sentidos que por sua vez, possibilitam definir-se as funções booleanas para cada motor:

Motor 1 no sentido normal:

DIR ESQ \ FRE TRA	00	01	11	10
00	0	0	0	1
01	0	0	0	0
11	0	0	0	0
10	1	0	0	0

$$MOTOR1 = \bar{S} \cdot F \cdot \bar{T} \cdot \bar{D} \cdot \bar{E} + \bar{S} \cdot \bar{F} \cdot \bar{T} \cdot D \cdot \bar{E}$$

Motor 2 no sentido normal:

DIR ESQ \ FRE TRA	00	01	11	10
00	0	0	0	1
01	0	1	0	0
11	0	0	0	0
10	0	0	0	0

$$MOTOR2 = \bar{S} \cdot F \cdot \bar{T} \cdot \bar{D} \cdot \bar{E} + \bar{S} \cdot \bar{F} \cdot \bar{T} \cdot \bar{D} \cdot E$$

Motor 1 Reverso:

DIR ESQ \ FRE TRA	00	01	11	10
00	0	1	0	0
01	0	0	0	0
11	0	0	0	0
10	1	0	0	0

$$MOTOR_1_REV = \bar{S} \cdot \bar{F} \cdot T \cdot \bar{D} \cdot \bar{E} + \bar{S} \cdot \bar{F} \cdot \bar{T} \cdot \bar{D} \cdot E$$

Motor 2 Reverso:

DIR ESQ \ FRE TRA	00	01	11	10
00	0	1	0	0
01	1	0	0	0
11	0	0	0	0
10	0	0	0	0

$$MOTOR_2_REV = \overline{S} \cdot \overline{F} \cdot T \cdot \overline{D} \cdot \overline{E} + \overline{S} \cdot \overline{F} \cdot \overline{T} \cdot D \cdot \overline{E}$$

Com tais funções pode-se desenhar o circuito lógico para o acionamento dos motores, que está representado na Figura 111.

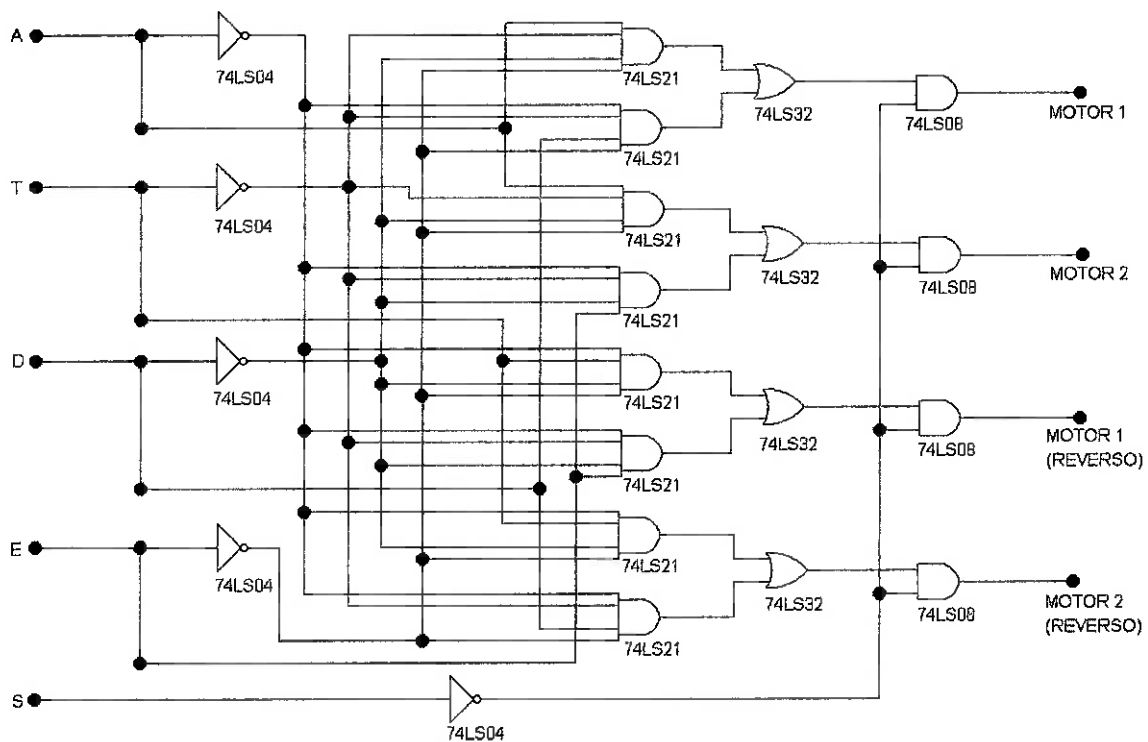


Figura 111: Circuito lógico de acionamento dos motores versão 1

Entretanto, tal circuito, é muito complexo e utiliza muitos CI's. Tal circuito pode ser simplificado, através da reorganização das funções booleanas:

$$MOTOR_1 = \bar{S} \cdot F \cdot \bar{T} \cdot \bar{D} \cdot \bar{E} + \bar{S} \cdot \bar{F} \cdot \bar{T} \cdot D \cdot \bar{E} = \bar{S} \cdot \bar{T} \cdot \bar{E} \cdot (F \cdot \bar{D} + \bar{F} \cdot D) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow MOTOR_1 = \bar{S} \cdot \bar{T} \cdot \bar{E} \cdot (F \oplus D)$$

$$MOTOR_2 = \bar{S} \cdot F \cdot \bar{T} \cdot \bar{D} \cdot \bar{E} + \bar{S} \cdot \bar{F} \cdot \bar{T} \cdot D \cdot \bar{E} = \bar{S} \cdot \bar{T} \cdot \bar{D} \cdot (F \cdot \bar{E} + \bar{F} \cdot E) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow MOTOR_2 = \bar{S} \cdot \bar{T} \cdot \bar{D} \cdot (F \oplus E)$$

$$MOTOR_1_REV = \bar{S} \cdot \bar{F} \cdot T \cdot \bar{D} \cdot \bar{E} + \bar{S} \cdot \bar{F} \cdot \bar{T} \cdot D \cdot \bar{E} = \bar{S} \cdot \bar{F} \cdot \bar{D} \cdot (T \cdot \bar{E} + \bar{T} \cdot E) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow MOTOR_1_REV = \bar{S} \cdot \bar{F} \cdot \bar{D} \cdot (T \oplus E)$$

$$MOTOR_2_REV = \bar{S} \cdot \bar{F} \cdot T \cdot D \cdot \bar{E} + \bar{S} \cdot \bar{F} \cdot \bar{T} \cdot D \cdot E = \bar{S} \cdot \bar{F} \cdot E \cdot (T \cdot \bar{D} + \bar{T} \cdot D) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow MOTOR_2_REV = \bar{S} \cdot \bar{F} \cdot E \cdot (T \oplus D)$$

Como observado tais alterações simplificam muito o circuito, que pode ser observado na Figura 112, e, conseqüentemente, diminui o número de CI's utilizados.

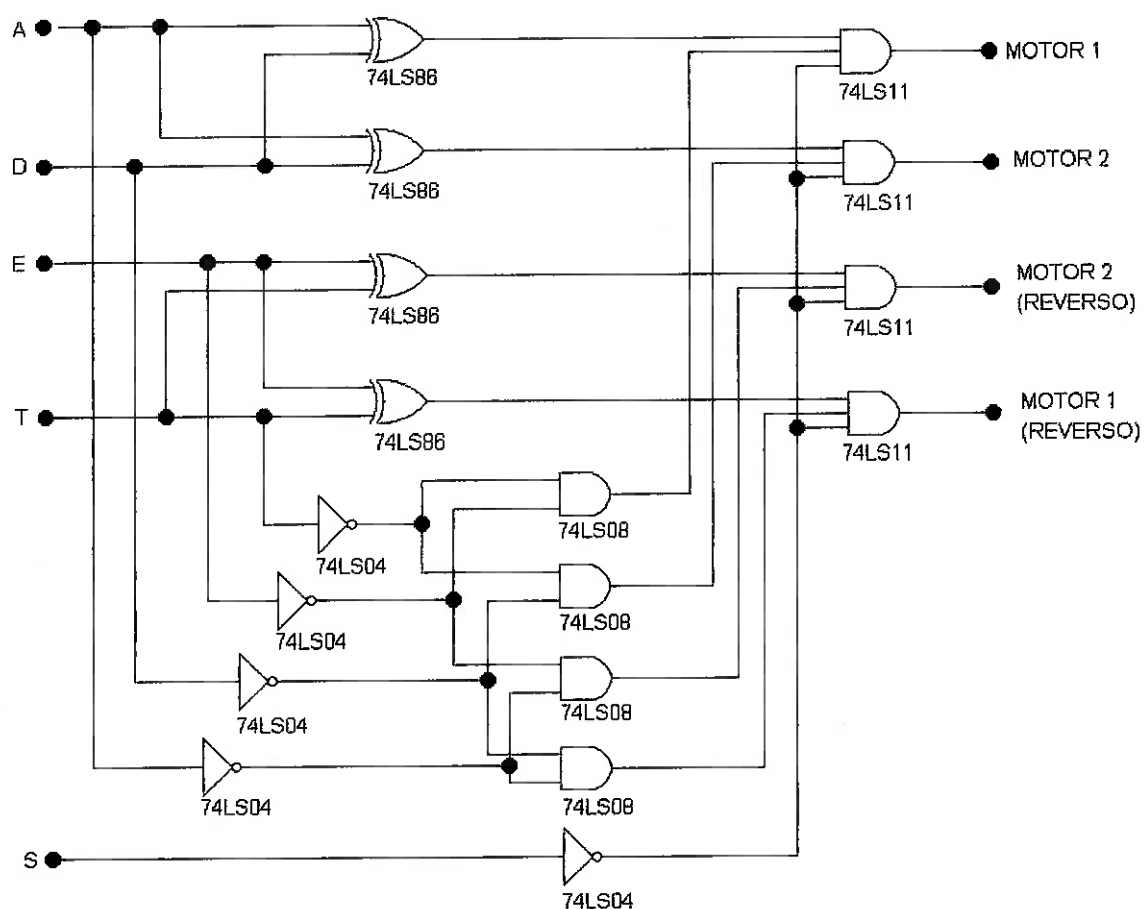


Figura 112: Circuito lógico de acionamento dos motores parcialmente otimizado

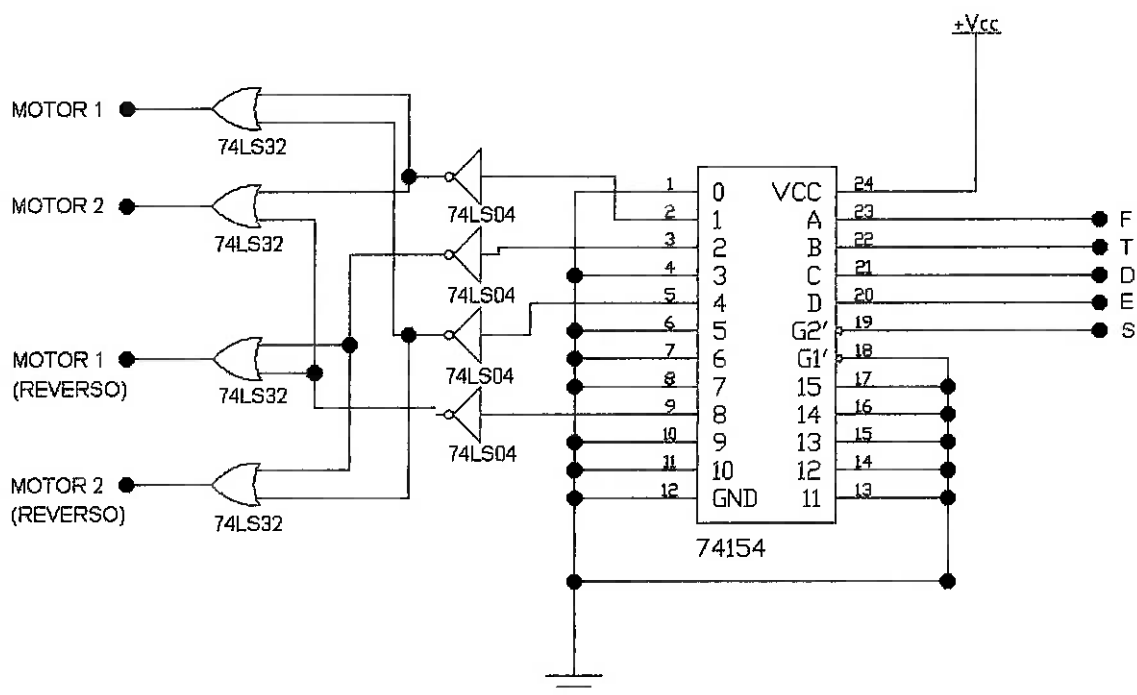


Figura 113: Circuito lógico para acionamento de motores versão final

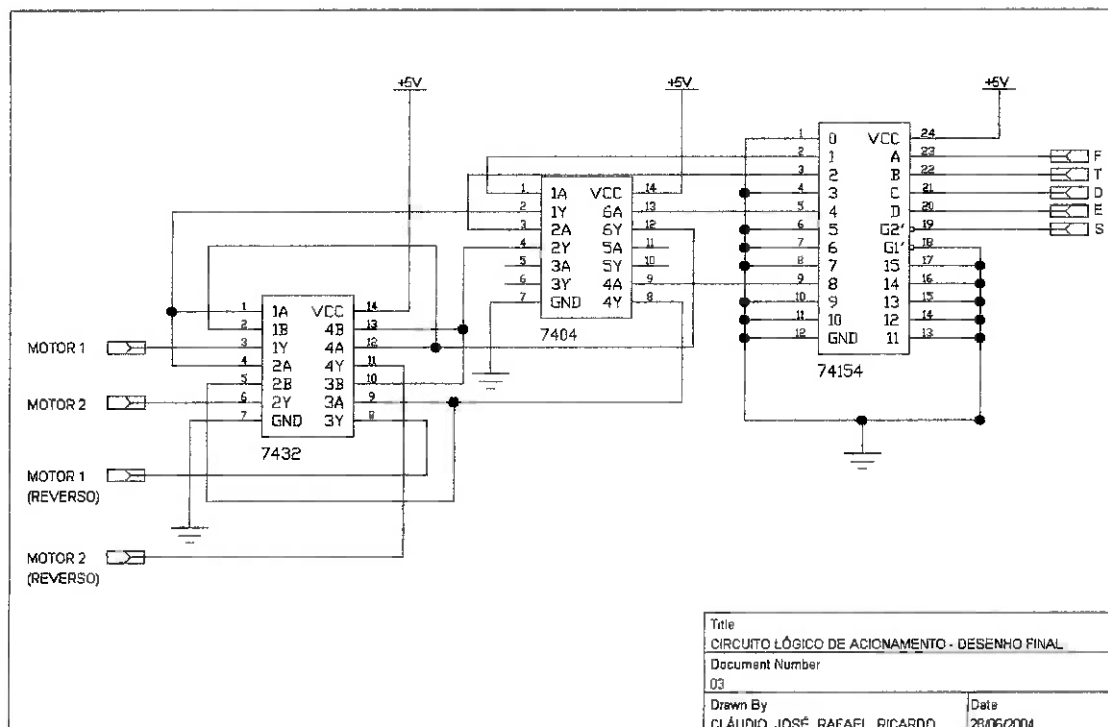


Figura 114: Circuito lógico para acionamento de motores com CI's

4.3. Lógica de acionamento do motor do braço

A movimentação do braço é feita através de um motor e é acionado através de dois botões, como ilustrado na Figura 115. A lógica do acionamento deve prever algumas condições:

- Quando acionado o botão 1, o motor deverá ser acionado no sentido horário;
- Quando acionado o botão 2, o motor deverá ser acionado no sentido anti-horário;
- Quando acionado ambos os botões, o motor não deverá ser acionado.

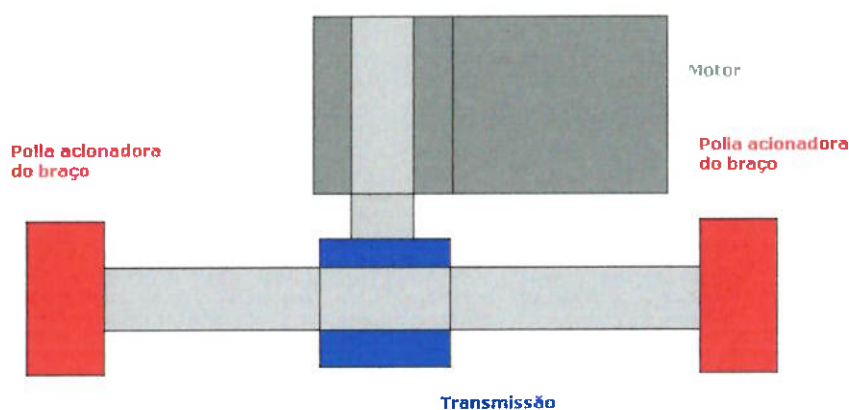


Figura 115: Acionamento do motor do braço

A partir das condições acima, construiu-se a tabela da verdade ilustrada na Tabela 11.

Tabela 11: Lógica de acionamento

BOTÃO 1	BOTÃO 2	MOTOR SENTIDO HORÁRIO	MOTOR SENTIDO ANTI-HORÁRIO
0	0	0	0
1	0	1	0
0	1	0	1
1	1	0	0

A partir da Tabela 11 observa-se facilmente que tal lógica se trata de um XOR, que está representado na Figura 116.

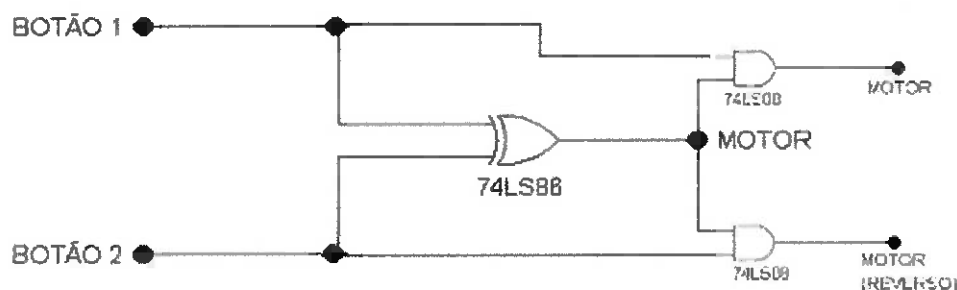


Figura 116: Circuito lógico para acionamento do motor do braço

Estas implementações utilizando lógica discreta se mostraram perfeitamente viáveis, mas por outro lado pertencem a uma tecnologia defasada e não permitem uma grande flexibilidade ao projeto. Sendo assim, buscou-se realizar alterações no projeto com o intuito de aumentar a flexibilidade do mesmo e incluir novas funcionalidades, alterações estas que serão detalhadas na sequência.

4.4. Aspectos gerais e mudanças ocorridas no projeto do módulo de controle

Durante o desenvolvimento do projeto do módulo de controle, inúmeras foram as alterações feitas entre o modelo inicialmente escolhido e o modelo definitivamente implementado. Dentre as modificações, a que pode ser considerada a mais radical foi a troca de toda a lógica de acionamento dos motores. No projeto inicial, toda a lógica de acionamento seria implementada utilizando-se portas lógicas e decoders (apesar de serem tecnologicamente mais defasados, funcionam perfeitamente e possuem baixo custo), enquanto que na implementação atual utilizou-se um microcontrolador para tal tarefa, visando maior flexibilidade.

Na Figura 117, estão algumas simulações utilizando o software *Eletronics Workbench*. Na análise lógica, os quatro sinais superiores representam os estados dos motores (de baixo pra cima): motor 1, motor 2, motor 1 reverso e motor 2 reverso; os

cinco sinais inferiores representam os sinais de controle (de cima para baixo): frente, trás, direita, esquerda e sinal de segurança.

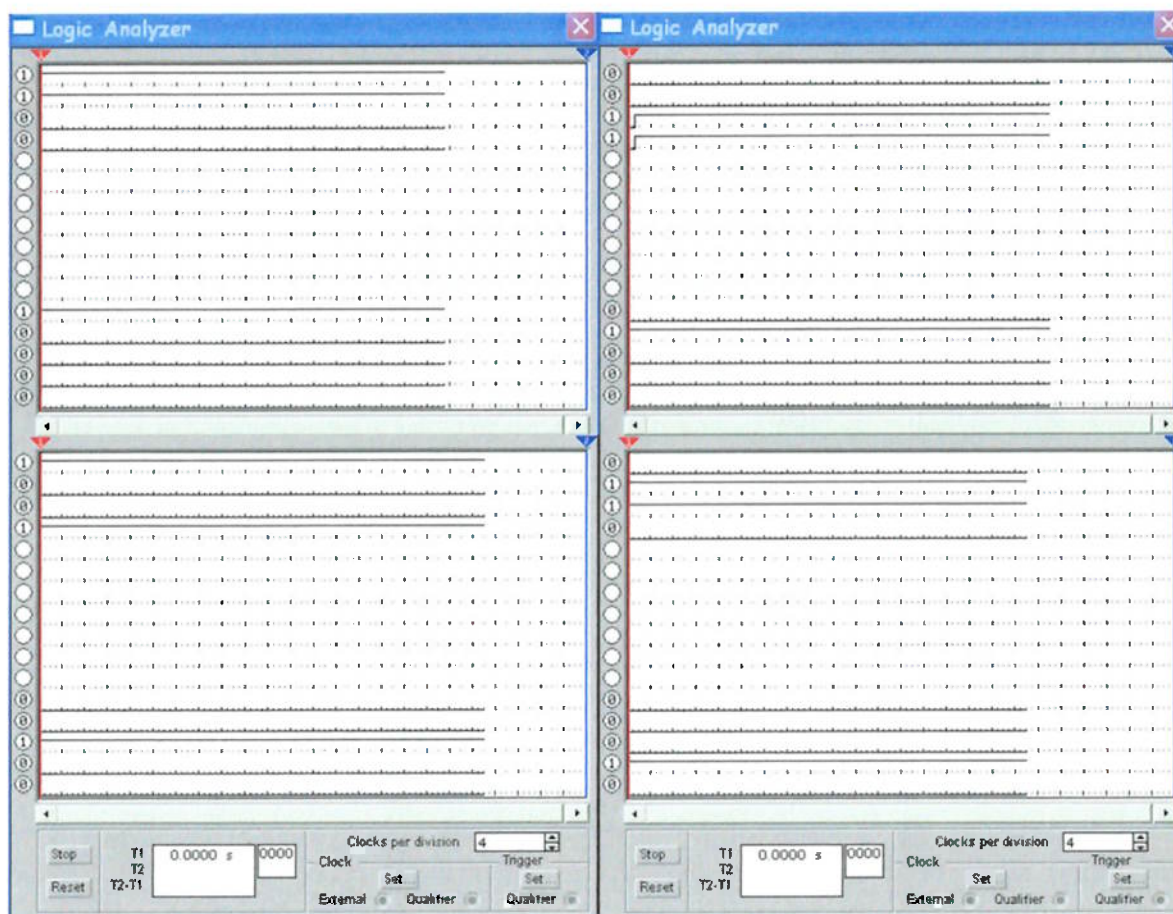


Figura 117: Simulação do módulo de controle desenvolvido inicialmente

Entretanto o maior problema apresentado são as limitações deste circuito, como por exemplo, no caso do acionamento simultâneo dos botões “frente” e “direita”, por segurança, todos os motores seriam desligados para evitar uma possível queima do circuito de potência (simulação apresentada na Figura 118).

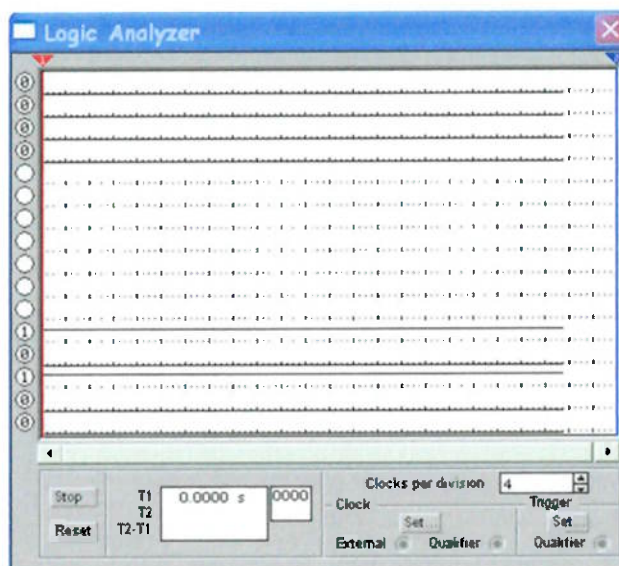


Figura 118: Simulação do circuito para duas entradas simultâneas ("frente" e "direita")

Duas são as possíveis formas de aprimorar os movimentos do robô, isto é, ao invés do robô apenas fazer curvas abruptas (quando é pressionado o botão esquerdo, ou direito, do direcional), permitir com que ele fosse capaz de realizar curvas mais abertas através do uso das diagonais (ou melhor, a combinação, por exemplo, de “frente” mais “direita”). A primeira solução possível é implementada com o acréscimo de outras portas lógicas, mas, para este caso, o circuito lógico se tornaria muito grande e complexo, necessitando de uma placa PCI maior e de uma maior atenção por parte do responsável pela montagem da placa, dado a enorme quantidade de fios e ligações que deveriam ser feitas.

A segunda alternativa para resolver este problema é a total substituição do circuito lógico por um microcontrolador. E esta foi a solução escolhida para o projeto do módulo de controle.

O uso de um microcontrolador proporciona uma série de facilidades e novas funções, uma vez que a lógica de acionamento é implementada através de um programa de controle. Com apenas algumas linhas de código já é possível obter o mesmo resultado que circuito inicialmente projetado. Para esta melhoria foi utilizado o um microcontrolador ATMEL modelo AT89S8252.

Entre as facilidades do uso do microcontrolador, têm-se o tamanho reduzido do circuito e a maior simplicidade da montagem. Outra vantagem é o custo, já que o preço do microcontrolador é menor que o preço total dos CI's utilizados anteriormente, bem como a relação custo/benefício do ATMEL que é muito maior que a dos CI's. Com o microcontrolador foi possível ampliar a quantidade de movimentos que o robô está habilitado a fazer, como, por exemplo, se mover na diagonal. Para executar tal tarefa, basta controlar a velocidade nos motores, que permite ao robô realizar curvas mais abertas e, por conseguinte, andar na diagonal. Os novos movimentos e as respectivas alterações no controle do motor podem ser mais bem explicadas com a ajuda do diagrama de blocos, apresentado na sequência:

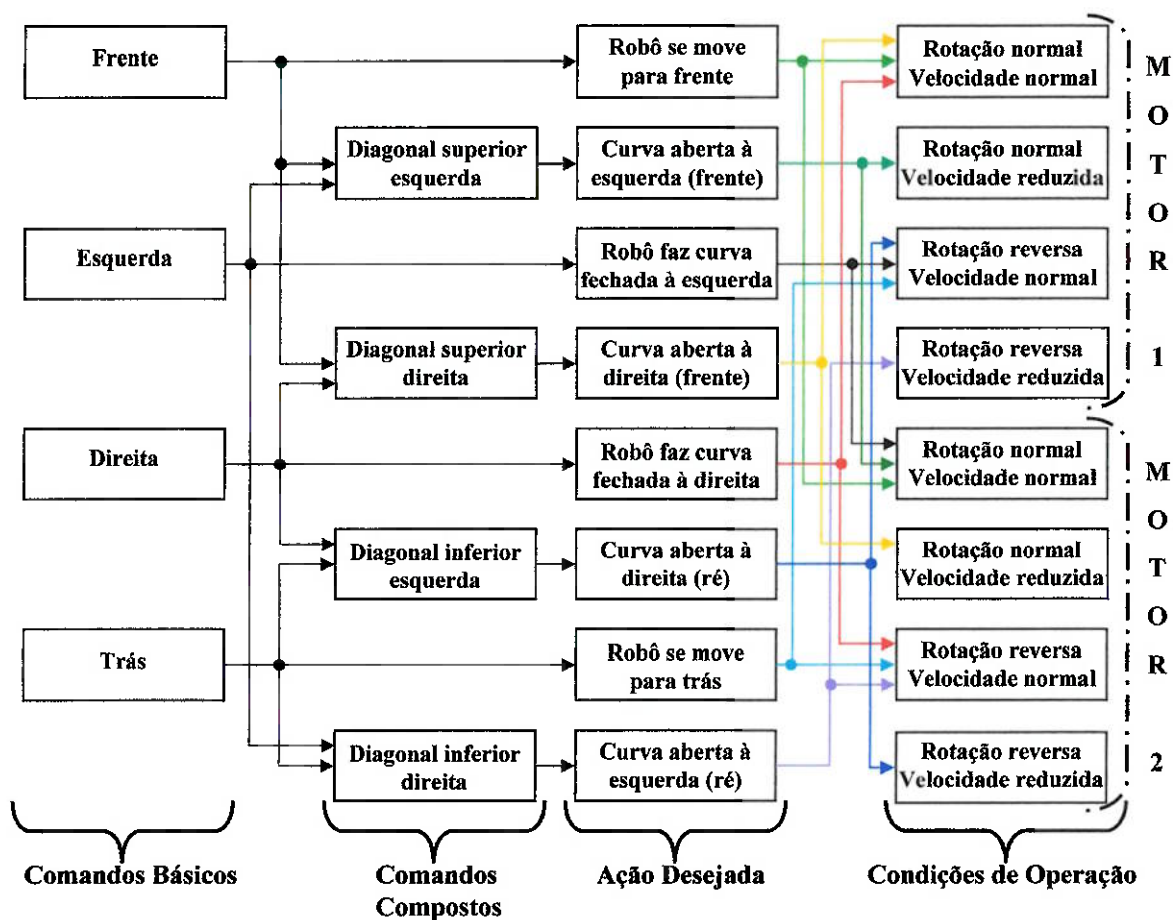


Figura 119: Diagrama de blocos da movimentação do robô

Uma boa maneira de compreender o funcionamento do módulo de controle é realizando uma análise estruturada do sistema, relacionado entradas, saídas e processos intermediários entre elas.

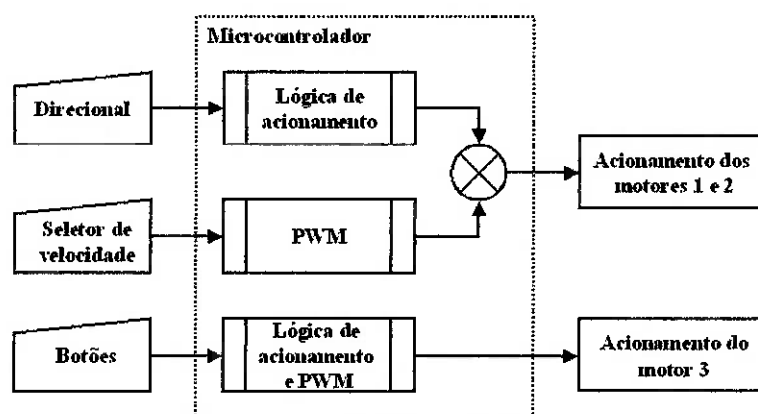


Figura 120: Análise do funcionamento do módulo de controle.

Com o seletor de velocidades é possível definir os parâmetros do PWM, este sistema em conjunto com os sinais provenientes do direcional, depois de serem interpretados pela lógica de acionamento, permitem a realização de qualquer movimento, incluindo curvas suaves.

Na Figura 119, os termos rotação normal e rotação reversa apenas distinguem o sentido de rotação do eixo do motor (horário ou anti-horário).

Utilizando apenas portas lógicas, o controle de velocidade dos motores não é uma tarefa simples. Para realizar tal controle é comumente utilizado um circuito do tipo PWM (*Pulse Width Modulation* ou Modulação por Largura de Pulso), que através do controle da largura do pulso de tensão limita a corrente fornecida ao motor e assim ajusta a velocidade do mesmo de acordo com as necessidades. Portanto, para implementar esta solução seriam necessários mais dois PWM's (um para cada sentido de rotação do motor). Para o microcontrolador é possível implementar um PWM via software, tornando-se uma solução muito interessante, já que, por se tratar de um software, é extremamente simples ajustar seus parâmetros e, conseqüentemente, a velocidade do motor. Com este controle de velocidade no motor, pode-se ter, por exemplo, o motor 1 funcionando com velocidade máxima (de acordo com o torque exigido pela carga) e o motor 2 funcionando com apenas um

terço de sua velocidade e esta combinação de eventos, portanto, faz com que o motor realize uma curva suave à direita.

Com o intuito de assegurar a integridade dos componentes, em especial do microcontrolador, o circuito de controle foi fisicamente isolado do circuito de potência. Como a corrente elétrica de operação do primeiro é da ordem de miliamperes e para o segundo é da ordem de amperes. Qualquer pulso de corrente proveniente do circuito de potência poderia danificar o microcontrolador. Para garantir essa separação foram utilizados acopladores ópticos, ou simplesmente optoacopladores.

Outra melhoria no módulo de controle foi a utilização de LED's, cuja principal função é a verificação do sistema. Para tanto foi acoplado a cada uma das entradas e saídas um LED, dessa forma é possível verificar se os sinais de controle (entradas) estão chegando corretamente no microcontrolador. Também é possível verificar as saídas e assim detectar eventuais erros no programa de controle.

Finalmente, para tornar cada módulo do subsistema eletroeletrônico totalmente independente entre si, foram utilizados diversos conectores. Sinais de controle são transmitidos de um módulo para outro através de conectores DB9. Para ligar a placa à fonte de alimentação (bateria) utilizou-se um conector J10 mono. Os demais módulos também estão todos conectados desta maneira, por exemplo, as pontes H, cada uma delas é montada em uma placa PCI diferente, um conector liga o módulo de controle com o módulo de potência, um outro conector (mais robusto, devido à corrente mais elevada) liga a ponte H à alimentação e a ponte ao motor elétrico. Ao se separar os módulos, a manutenção do conjunto fica muito mais simples, afinal, caso uma placa queime, basta substituí-la sem, contudo, precisar retirar as outras placas de seus devidos lugares.

Para limitar a tensão de alimentação do microcontrolador, utiliza-se um regulador de tensão (LM7805), que é responsável por reduzir a tensão da bateria (12V) para a tensão de trabalho dos CI's (5V).

Tendo em vista todas essas considerações montou-se o módulo de controle. As fotos a seguir mostram uma versão inicial do módulo de controle, que foi construída em uma placa padrão.

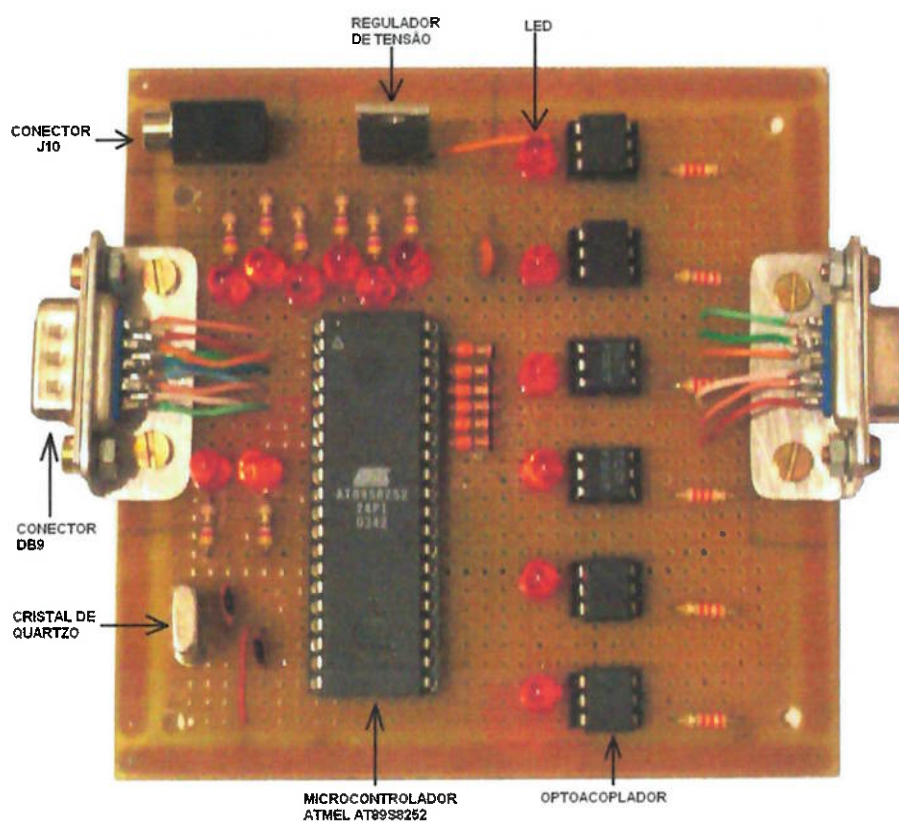


Figura 121: Foto do módulo de controle



Figura 122: Regulador de tensão LM7805

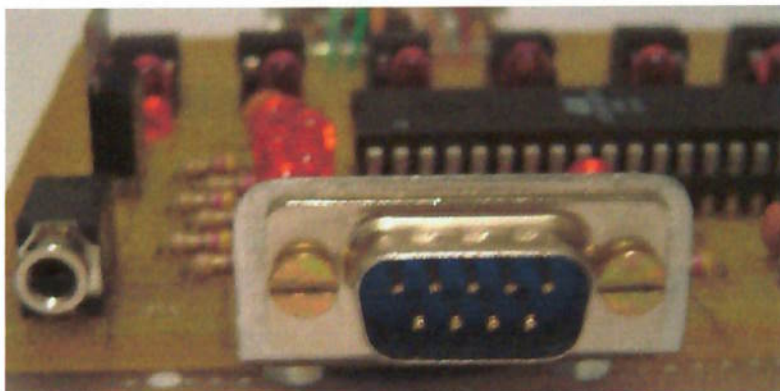


Figura 123: Conectores J10 e DB9

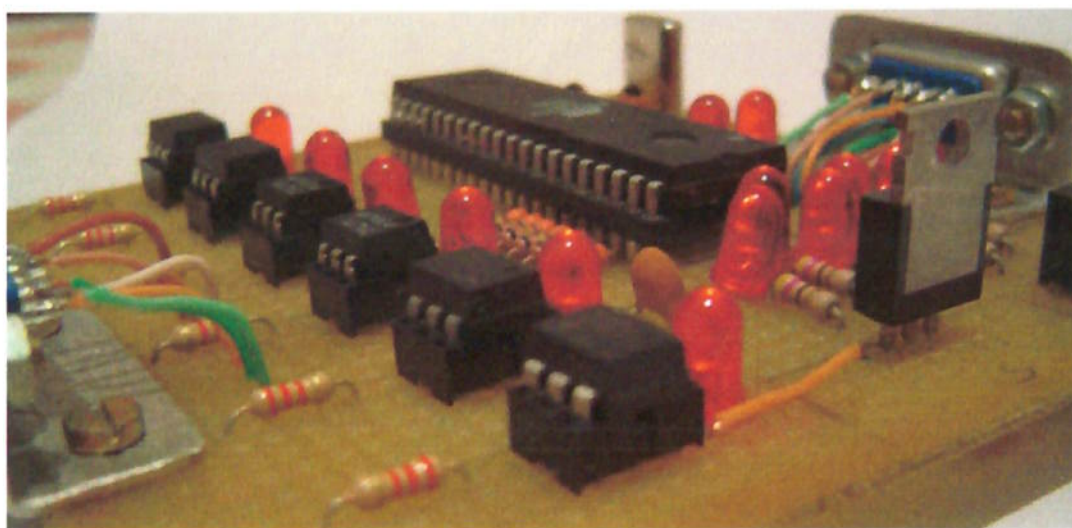


Figura 124: Microcontrolador, optoacopladores, LED's e regulador de tensão

Após alguns testes, concluiu-se que o módulo de controle funciona perfeitamente como o esperado, e então se decidiu aprimora-lo e realizar uma construção mais esmerada, refazendo este circuito em uma placa de circuito impresso e acrescentando a funcionalidade de gravação do microcontrolador Atmel na própria placa, de forma a facilitar o procedimento de gravação do programa e os testes necessários.

Para desenhar o layout da placa utilizou-se o programa Eagle, o layout final está mostrado na Figura 125.

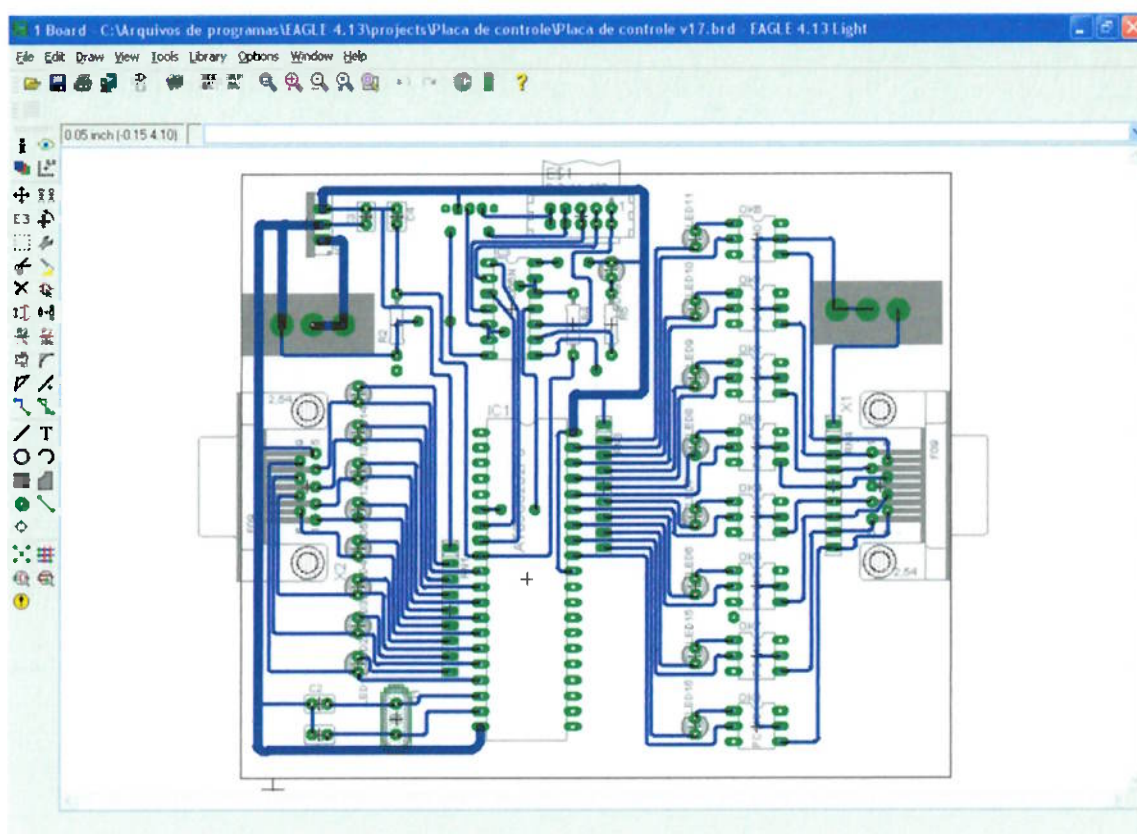


Figura 125: Layout da placa de controle

Para a gravação do microcontrolador optou-se por utilizar a configuração de gravação serial, mas no computador optou-se por utilizar a porta paralela do computador principalmente pela necessidade de fornecer 3 pinos de sinal, sendo eles o um clock de gravação, um sinal de habilita gravação e o sinal dos dados propriamente dito, também existe o quarto pino que é para a recepção de dados e o quinto pino é a referência de terra.

Para diminuir o risco de danificar o microcontrolador ou a porta paralela utilizou-se um CI chamado 4066 que é um switch quádruplo e bilateral, de forma que este circuito faz o papel de isolador entre o computador e o microcontrolador.

A partir destas alterações pode-se construir a versão final do módulo de controle mostrado na Figura 126.

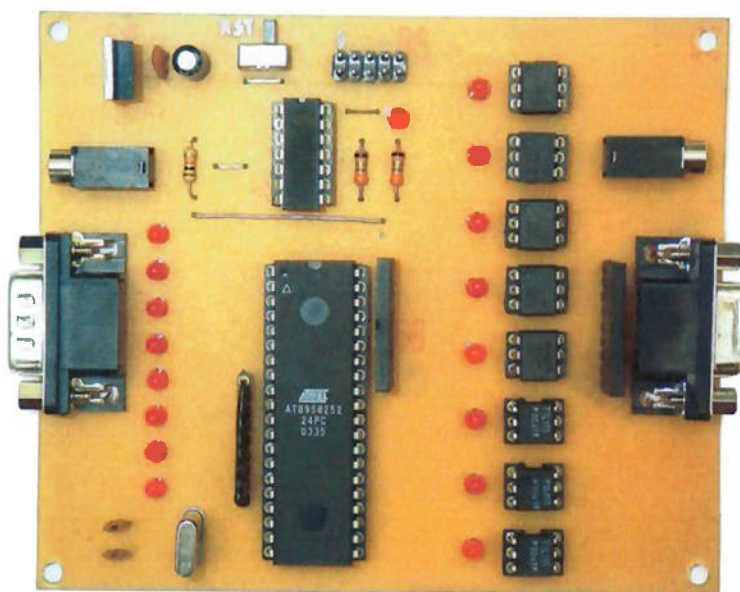


Figura 126: Versão final da placa de controle

4.5. Detalhamento dos elementos do módulo de controle

O próximo passo, após explicar as mudanças ocorridas no módulo de controle e apresentar os elementos mais importantes da mesma, é mostrar os detalhes técnicos, apresentando as justificativas certas decisões tomadas ao se projetar esta placa. Neste tópico também são descritos alguns parâmetros do software a ser implementado no microcontrolador.

4.5.1. Microcontrolador ATMEL AT89S8252

É um microcontrolador de baixa potência, com tecnologia CMOS de 8 bits de alto desempenho, possui 8 Kbytes de memória Flash e 2 Kbytes de memória EEPROM (memória tipo ROM que é programada e apagada eletricamente, cuja maior vantagem está na possibilidade de apagar e re-programar palavras individuais, sem a necessidade de apagar a memória toda). Este microcontrolador proporciona uma grande flexibilidade e um bom custo/benefício para diversos sistemas embarcados. O AT89S8252 também possui 256 bytes de memória RAM e 32 pinos configuráveis como entradas e saídas. Sua memória Flash suporta 1000 ciclos de

programação e a EEPROM até 100 mil ciclos. Outras características presentes no microcontrolador são a interface serial SPI (*Serial Peripheral Interface*, que permite a conexão entre microcontroladores e dispositivos externos, tais como memória, conversores A/D, D/A, display de cristal líquido etc), os três *timers*/contadores de 16 bits, as interrupções (que podem ser tanto internas, quanto externas) e a faixa de operação entre 4V e 6V.

A figura a seguir representa a posição e nomenclatura de cada um dos pinos do AT89S8252.

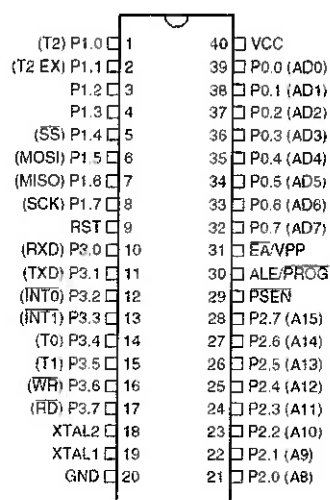


Figura 127: Pinagem do AT89S8252

Em seguida é apresentada uma rápida descrição da função de alguns pinos do microcontrolador, bem como algumas de suas funções especiais.

- *VCC*: alimentação;
- *GND*: terra;
- *P0*, *P1*, *P2* e *P3*: portas de bits bidirecionais (entradas e saídas);
- *RST*: reset;
- $\overline{ALE}/\overline{PROG}$, $\overline{PSEN}$ e $\overline{EA}/VPP$: usados para carregar os programas no microcontrolador. Sendo que $\overline{PSEN}$ permite a armazenagem de programas e $\overline{EA}$ permite o acesso externo ao AT89S8252;
- *RXD* e *TXD*: porta serial (entrada e saída, respectivamente);
- *XTAL1* e *XTAL2*: entrada e saída, respectivamente, do oscilador (amplificador de inversão);
- $\overline{WR}$: *strobe* de escrita de dados externos;

- $\overline{RD}$: *strobe* de leitura de dados externos;
- *MISO* e *MOSI*: entrada e saída, respectivamente, para a interface SPI;
- *SCK*: *clock* para a interface SPI.

Para o AT89S8252, seu funcionamento pode ser representado pelo diagrama de blocos da Figura 128.

Uma função muito útil do microcontrolador é sua interface serial para periféricos, esta interface permite transmitir dados em uma elevada velocidade (frequência de bits de 1,5 MHz, máxima), seja entre outro AT89S8252 ou mesmo outro periférico. Também é possível programar até quatro taxas diferentes de transmissão de bits. O microcontrolador possui um *flag* de interrupção que indica o final da transmissão e um *flag* de proteção, que evita sobreposição entre as mensagens.

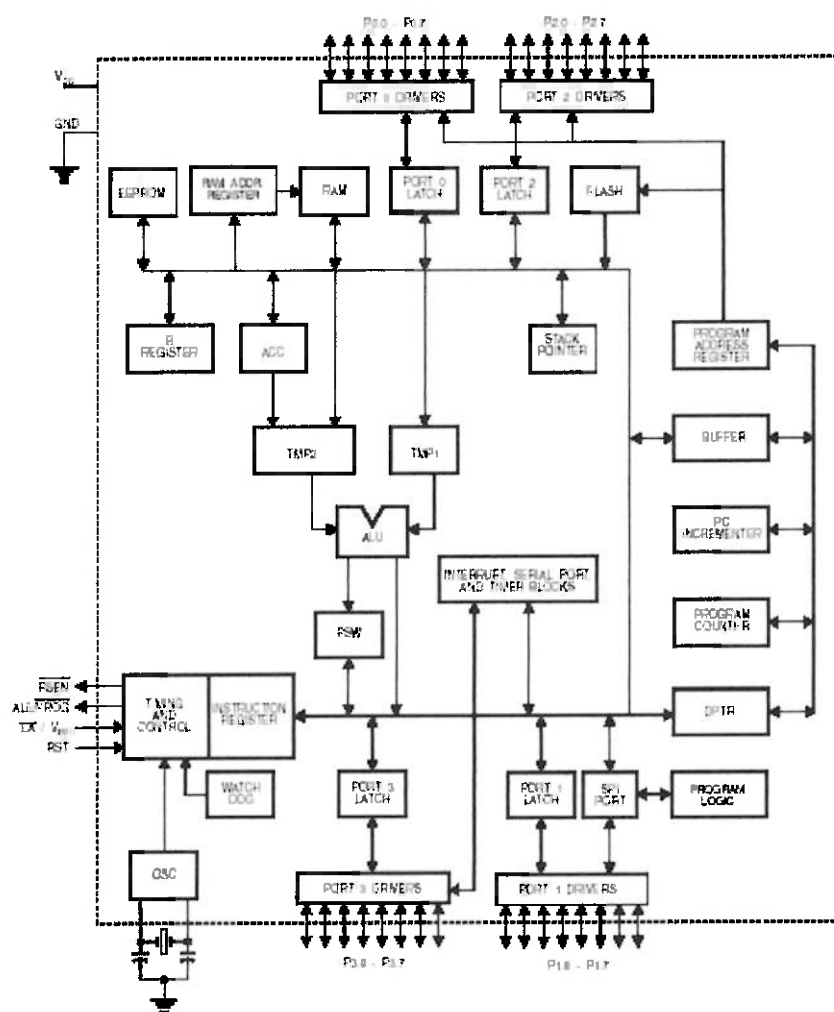


Figura 128: Diagrama de blocos representando o funcionamento do AT89S8252

A programação do ATMEL pode ser feita de duas maneiras, uma paralela e outra serial. Sendo que cada uma tem seu próprio algoritmo de programação. A programação paralela pode ser representada pela figura a seguir:

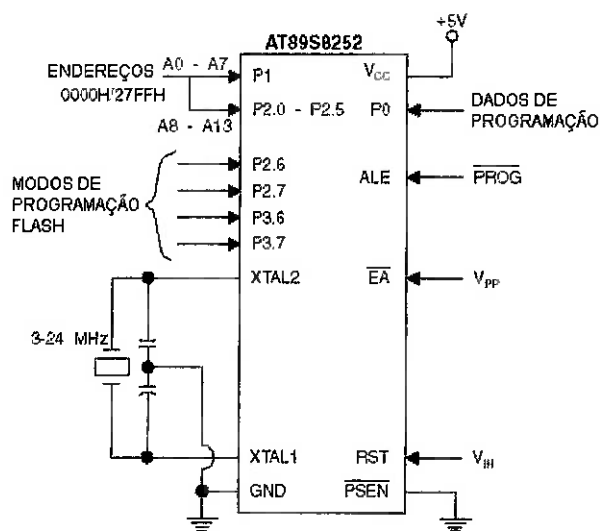


Figura 129: Esquema para programação paralela das memórias Flash e EEPROM

Como podem ser observadas na figura anterior, as portas P0 são responsáveis por receber o programa propriamente dito; as portas P1 e P2.0 até P2.5 recebem os bytes de endereço. Os pinos P2.6, P2.7, P3.6 e P3.7 são incumbidos de selecionar uma das funções de programação (de acordo com os níveis lógicos, alto e baixo, apropriadamente aplicados nestas portas). Para a programação paralela também existe a possibilidade de verificação do programa, através do estado dos *lock bits*. Para esta operação de verificação, o esquema de entradas e saídas é praticamente o mesmo, com exceção dos pinos P0, que desta vez enviam os dados do programa, esta situação é ilustrada abaixo:

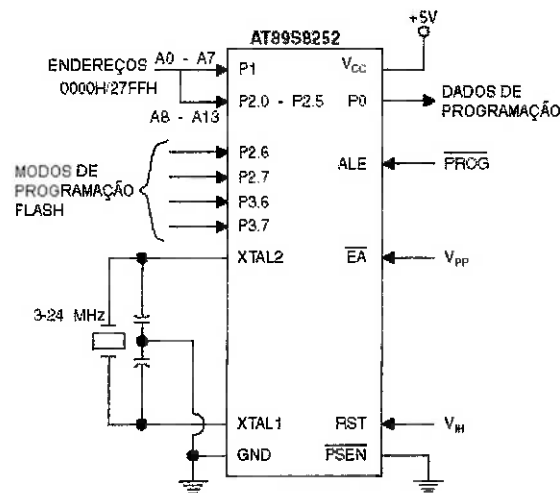


Figura 130: Esquema para verificação paralela das memórias Flash e EEPROM

Na memória Flash e EEPROM, todos os *arrays* de dados podem ser escritos ou apagados, bastando apenas utilizar a combinação de controle apropriada. Tanto o código quanto os dados de memória podem ser programados com auxílio da interface serial SPI do microcontrolador. Lembrando que código e dados possuem endereços separados, sendo do os endereços de 0000H até 1FFFH destinados ao armazenamento do código e de 000H até 7FFH para os dados. A seguir é ilustrada a situação onde se realiza a programação serial do AT89S8252, na figura é nítida a simplicidade da montagem serial em relação a paralela.

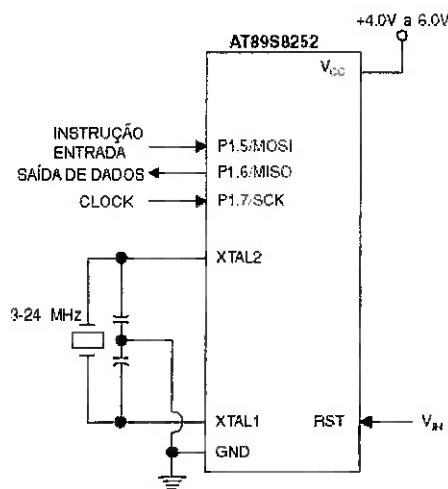


Figura 131: Esquema para programação serial das memórias Flash e EEPROM

Para iniciar a programação serial é preciso enviar a instrução de *enable* pela porta P1.5, além de ajustar o *clock* da porta P1.7. Qualquer locação de memória pode ser verificada utilizando a instrução de leitura, a qual retorna o conteúdo do endereço selecionado pela saída serial em P1.6. As instruções para a programação serial seguem um protocolo de comunicação composto por três bytes.

A seguir é apresentada uma foto do microcontrolador AT89S8252, utilizado na placa de controle do robô.

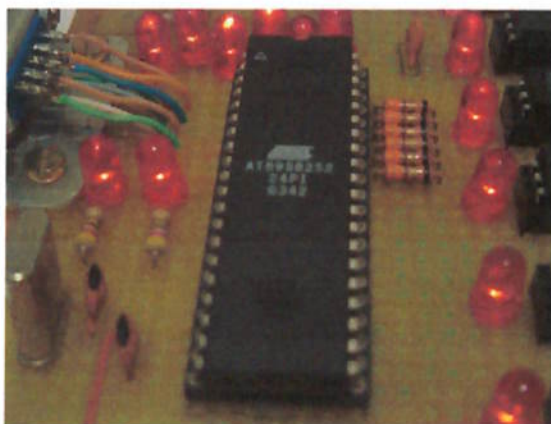


Figura 132: Microcontrolador ATMEL AT89S8252

4.5.2. Cristal de Quartzo

As portas 18 e 19 do microcontrolador, chamadas de XTAL1 e XTAL2, respectivamente, constituem a entrada e saída de um amplificador de inversão, que pode ser configurado para o uso como um oscilador. Para tanto se pode utilizar um cristal de quartzo ou ressonador cerâmico. O esquema da montagem é apresentado na figura a seguir:

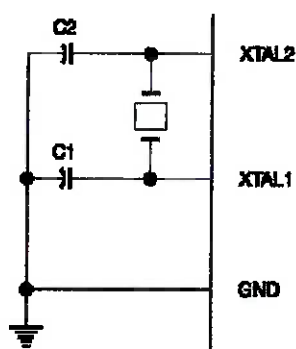


Figura 133: Representação esquemática das conexões para o oscilador

No robô é utilizado um cristal de quartzo de 12 MHz, responsável pela função de oscilador, isto é, fornecerá o *clock* ao microcontrolador. Para o AT89S8252 a frequência de oscilação deve estar compreendida entre 3 e 24 MHz, logo o cristal utilizado está dentro das especificações. Na figura acima, GND significa o terra do microcontrolador (pino 20) e C1 e C2 capacitores. De acordo com a própria especificação do microcontrolador, os capacitores devem ser $C1 = C2 = 30\text{ pF} \pm 10\text{ pF}$, utilizando-se o cristal de quartzo. Para o ressonador cerâmico estes valores de C1 e C2 são diferentes. Abaixo está uma foto do cristal utilizado no módulo de controle.

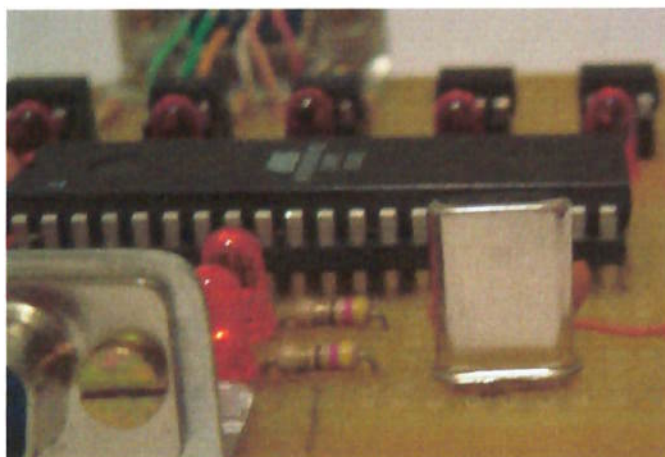


Figura 134: Cristal de quartzo de 12 MHz utilizado no módulo de controle

4.5.3. Optoacopladores

Dada a sua enorme utilidade, os optoacopladores, são amplamente utilizados em diversos circuitos, tais como reguladores de tensão, controles industriais, isolar entradas e saídas de microprocessadores, circuitos de lógica digital etc.

Ele é constituído por um diodo, que emite luz infravermelha, a qual controla a corrente que passa na base de um foto-transistor. Portanto existem duas linhas de corrente isoladas, uma circulando no diodo e a outra no transistor. Sendo assim, é possível separar fisicamente o módulo de controle do módulo de potência, protegendo, por exemplo, o microcontrolador de um inesperado pico de corrente no circuito de potência, a qual poderia comprometer a integridade dos elementos da

placa de controle. A Figura 135 apresenta uma representação esquemática do optoacoplador utilizado no robô.

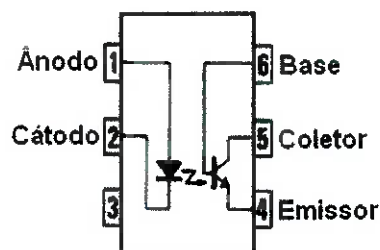


Figura 135: Representação esquemática do optoacoplador

O modelo utilizado no robô é o TIL111, seus pontos fortes são a enorme facilidade de encontrá-lo no mercado (facilitando eventuais reposições), o baixo custo e a corrente máxima em seu coletor de 100 mA, superior aos modelos similares (TIL111-M e TIL117-M, ambos com corrente máxima de 60 mA). Outra especificação muito importante é a queda de tensão no fotodiodo, que é de 1,2 V (tipicamente, podendo chegar até 1,4 V). a seguir, uma foto dos fotoacopladores utilizados no módulo de controle do robô.

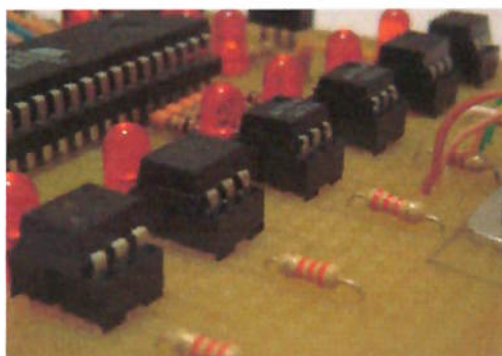


Figura 136: Optoacopladores TIL111, no módulo de controle

4.5.4. Switch analógico

O switch analógico 4066 é um componente de grande importância que é utilizado em diversas aplicações como um isolador entre dois circuitos, devido a sua

característica de seguir analogicamente o sinal das entradas e colocá-lo nas saídas, sempre que seu pino de enable está habilitado. Uma característica interessante é a sua bidirecionalidade, isto é os pinos que hora são usados para entrada podem ser usados para as saídas.

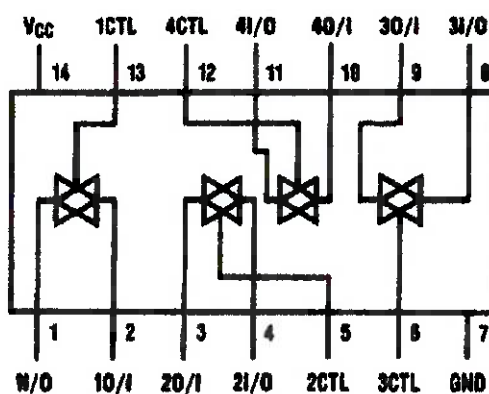


Figura 137: Representação esquemática do Switch

A grande importância deste componente no circuito é a sua capacidade de permitir um isolamento entre a entrada de gravação da placa de controle e a saída paralela do computador, além de fornecer uma proteção contra descargas eletrostáticas tanto em suas entradas como em suas saídas.

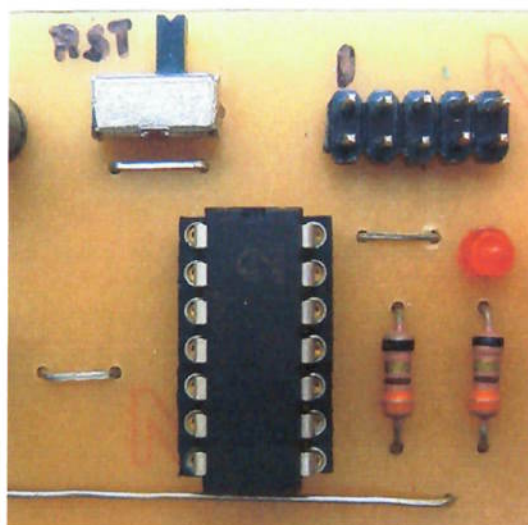


Figura 138: Foto do Switch 4066

4.5.5. Fabricação do circuito impresso e montagem da placa de controle

Para a construção da versão final da placa de controle é necessário passar por algumas etapas de fabricação que vão desde o projeto do circuito até sua corrosão e montagem. Primeiro é necessário desenhar o esquema elétrico do módulo de controle no programa de layout de placas de circuito impresso, para que dessa forma seja possível transferir o circuito para a placa a ser corroída com grande precisão. Neste caso utilizou-se o Eagle para fazer o layout da placa, este programa que possui uma versão de demonstração gratuita disponível.

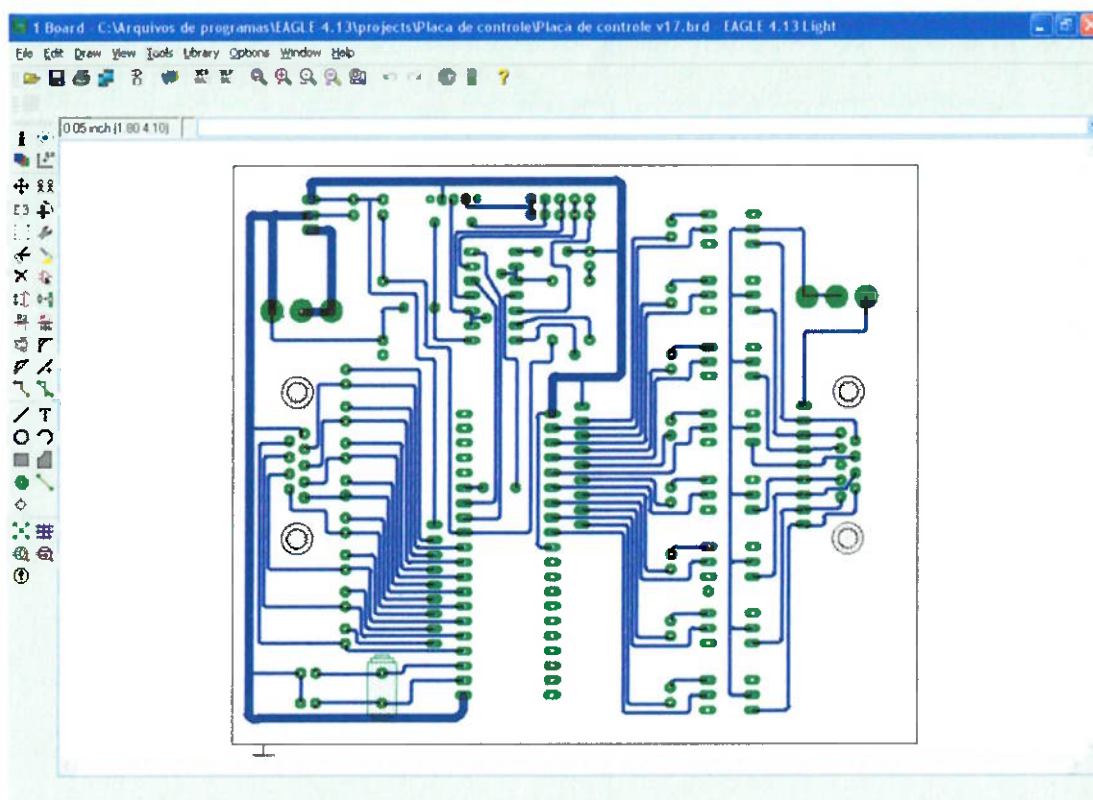


Figura 139: Esquema elétrico desenhado no programa Eagle

Para a transferência do layout do programa para a placa é necessário primeiro imprimir o circuito em uma transparência e em seguida pintar o circuito de controle com uma tinta foto-sensível para depois expor a placa com a máscara de transparência à luz ultravioleta (UV). A tinta foto-sensível utilizada no projeto é o fotoresiste que possui como principal característica, a sua polimerização ao ser

exposta aos raios UV, isto é, ao se polimerizar a tinta deixa de ser solúvel em álcool, não sendo mais possível tirá-la com um simples banho de álcool na placa.

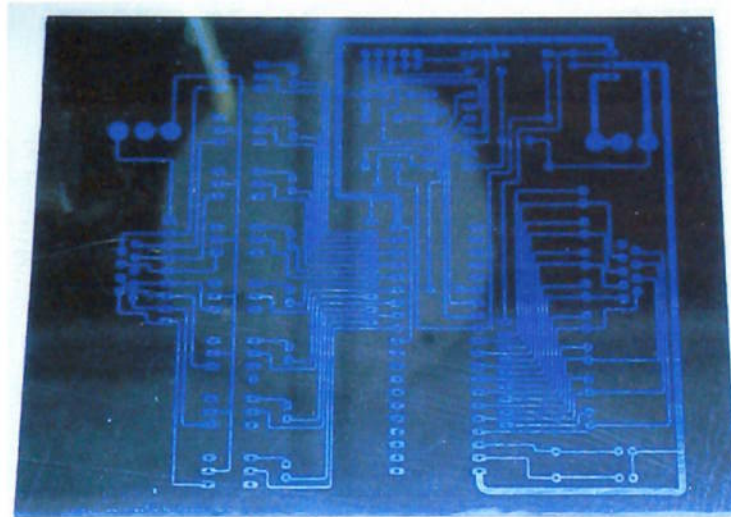


Figura 140: Placa durante a exposição

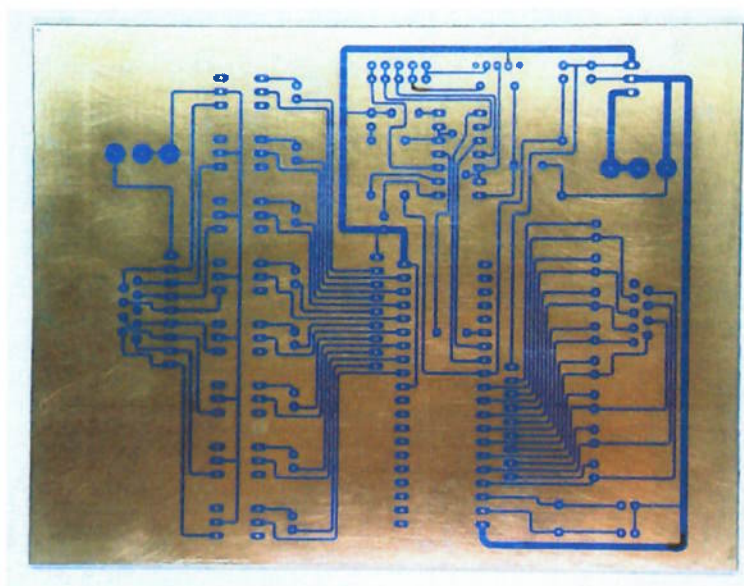


Figura 141: Placa após a exposição e revelação

Depois de transferir a imagem para a placa é necessário realizar sua corrosão em percloreto de ferro, na qual serão corroídas apenas as regiões desprotegidas da tinta.

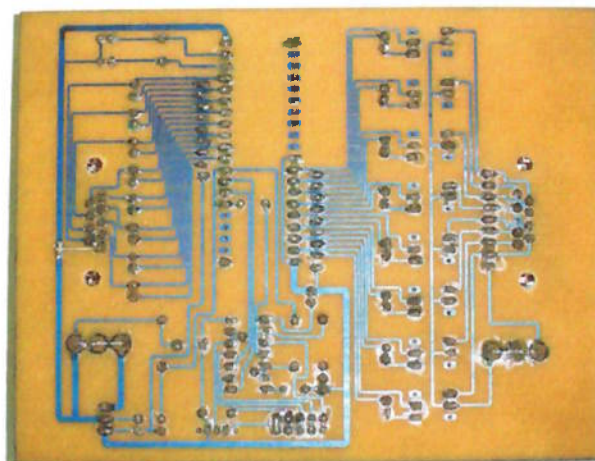


Figura 142: Placa após corrosão

Após a criação da placa de circuito impresso é necessário fazer a furação dos locais necessários para em seguida soldar os componentes.

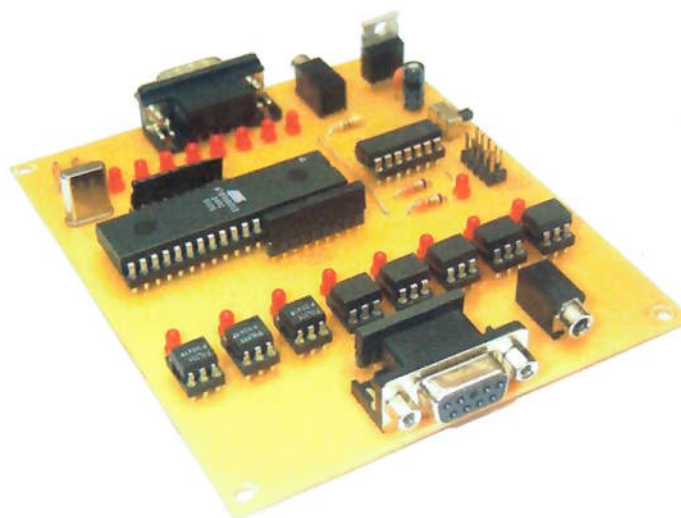


Figura 143: Placa de controle pronta

4.5.6. Procedimentos da programação do microcontrolador

A programação do microcontrolador pode ser realizada em diversas linguagens, desde que se tenha o compilador adequado. Neste caso a programação foi feita utilizando-se a linguagem assembler no programa Proview 32, compilador para o ATMEL.

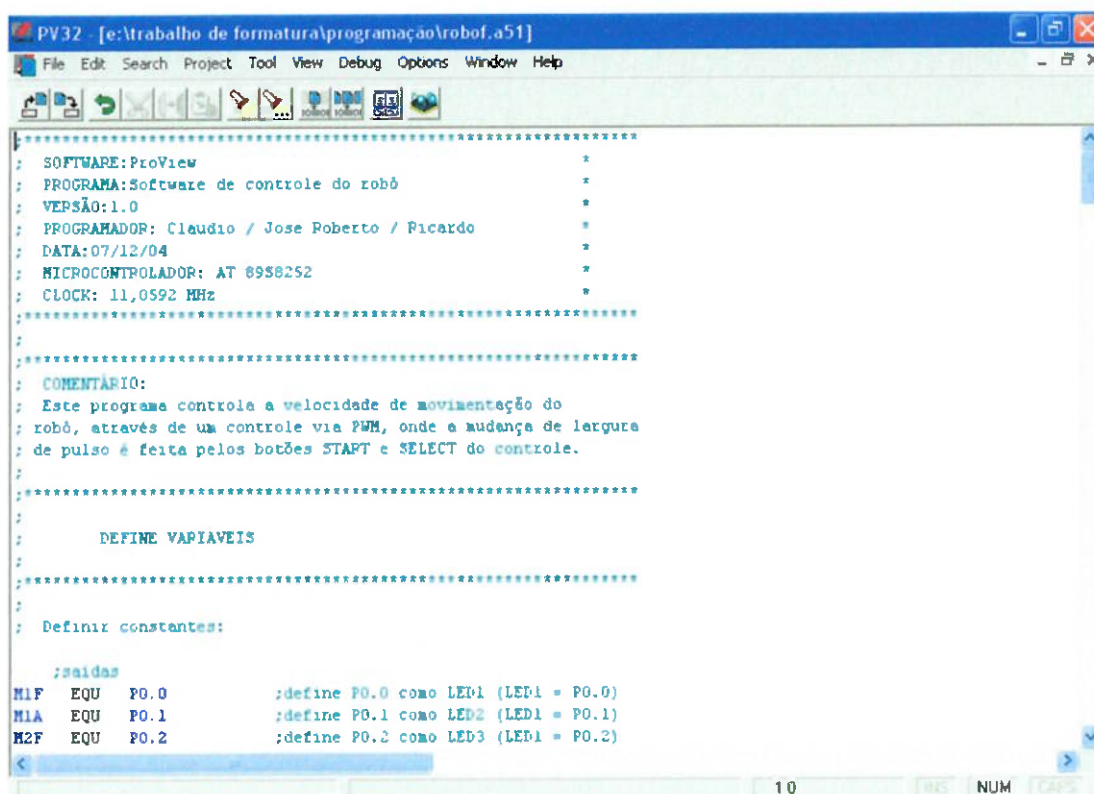


Figura 144: Exemplo de janela do compilador

Depois de escrito, o programa deve ser compilado para em seguida ser carregado no IcProg, programa que realiza o download para o microcontrolador. Este programa permite a utilização da porta paralela para a realização da gravação, mas para isso é necessário que a ligação mostrada na Tabela 12.

Tabela 12: Ligação entre o microcontrolador e o PC

FUNÇÃO	PINO DO CONECTOR NA PLACA DE CONTROLE	PINO DA PORTA PARALELA
Habilita o switch e envia um sinal HI no reset do ATMEL	1	17
Terra	2	25
Saída de dados do ATMEL para a verificação da programação	3	11
Clock para a gravação	4	3
Entrada de dados do ATMEL para a gravação	5	2

Para se realizar a programação é necessário conectar a entrada de gravação na porta paralela do computador, em seguida configurar o IcProg para a gravação do microprocessador desejado e solicitar que o IcProg grave o ATMEL. Após a gravação não é necessário retirar o cabo de gravação para poder testar o programa gravado, porque o programa de gravação retira o sinal HI dos pinos de saída da porta paralela.

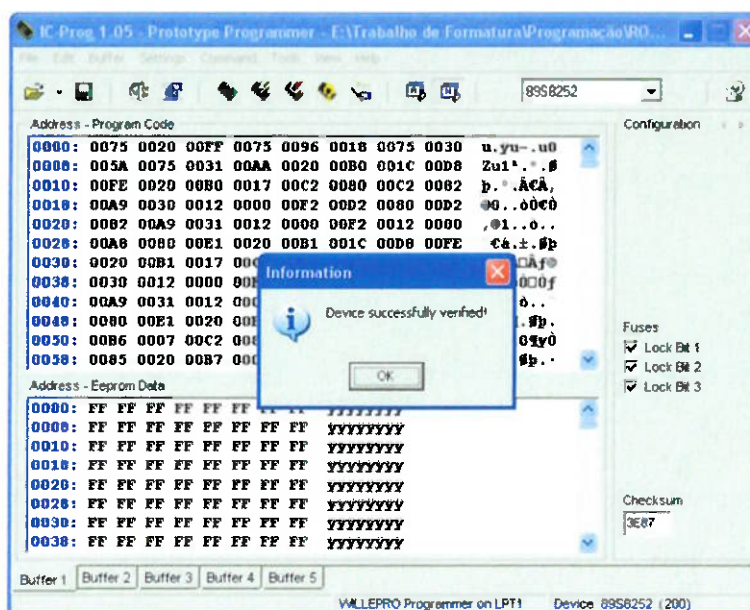


Figura 145: Gravação do microcontrolador

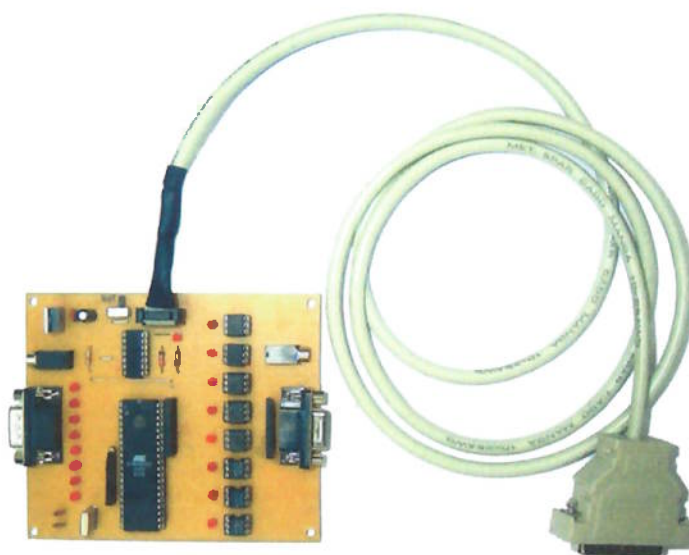


Figura 146: Placa de controle com o cabo de gravação

4.5.7. Relação entre *hardware* e *software*

Para o correto funcionamento da placa controladora é muito importante que todos os sinais de controle, enviados através do conector DB9, sejam enviados às portas adequadas do ATMEL, isto é, o programa implementado no microcontrolador possui variáveis (*software*) que recebem os valores das entradas (verdadeiro ou falso), cada variável é associada a uma porta, estas por sua vez é o próprio pino (*hardware*) do microcontrolador. A confusão está no fato de que para a montagem da placa, olha-se o número dos pinos, mas para a programação preocupa-se com o nome da porta. Dessa forma pode ser muito interessante apresentar uma tabela que relacione todas essas informações, de modo a facilitar a visualização de, por exemplo, qual variável recebe o comando para o robô se movimentar para frente.

Tabela 13: Relação entre os comandos, pino, portas e variáveis

COMANDO ENVIADO	PINO DO CONECTOR DB9	PINO DO MICRO-CONTROLADOR	NOME DA PORTA DO ATMEL	VARIÁVEL DO PROGRAMA
Aumenta a velocidade dos motores	9	14	P3.4	PWMA
Diminui a velocidade dos motores	8	15	P3.5	PWMB
Abaixa o braço do robô	7	16	P3.6	BRB
Levanta o braço do robô	6	17	P3.7	BRL
Robô se move para frente	2	10	P3.0	MTF
Robô se move para trás	3	11	P3.1	MTA
Robô se vira para esquerda	4	12	P3.2	MTE
Robô se vira para direita	5	13	P3.3	MTD

Esta mesma análise também pode ser feita para as saídas do microcontrolador, com algumas diferenças, neste caso a partir das variáveis do programa chega-se às ações realizadas.

Tabela 14: Relação entre variáveis, portas, pinos e ações

VARIÁVEL DO PROGRAMA	NOME DA PORTA DO ATMEL	PINO DO MICRO-CONTROLADOR	PINO DO CONECTOR DB9	AÇÃO REALIZADA (SENTIDO DE ROTAÇÃO DO MOTOR)
M1F	P0.0	39	6	Motor 1: sentido normal
M1A	P0.1	38	2	Motor 1: sentido reverso
M2F	P0.2	37	3	Motor 2: sentido normal
M2A	P0.3	36	7	Motor 2: sentido reverso
BRS	P0.4	35	4	Motor 3: sentido anti-horário
BRD	P0.5	34	8	Motor 3: sentido horário

Onde:

- motor 1 e motor 2 são os motores responsáveis pela locomoção do robô
- motor 3 pela movimentação do braço.

4.5.8. O esquema elétrico do módulo

Depois de estudadas as características de cada componente da placa, foi feito o desenho elétrico. Este desenho é apresentado na figura Figura 147. A utilização de diversos elementos desta montagem, como o cristal de quartzo ou mesmo o regulador de tensão, já foram previamente explicados, neste ponto apenas serão discutidos alguns pontos pendentes.

alto lógico e, portanto, não há corrente elétrica circulando. Pela configuração dos contatos no *joystick*, nota-se que quando alguém aperta um dos botões, o contato fecha, aterrando todo o circuito, portanto, o sinal de controle (que chega ao conector DB9) está em nível baixo, zero. Supondo que alguém queira que o robô vire à direita, ela aperta o direcional, fechando o contato e levando o pino 5 do DB9 para zero volt. Nesta nova situação, em uma das extremidades tem-se nível alto (5V) e na outra baixo (0V), graças à diferença de potencial, a corrente elétrica passa pelo circuito. Esta situação é ilustrada pela figura abaixo pelo fio em vermelho.

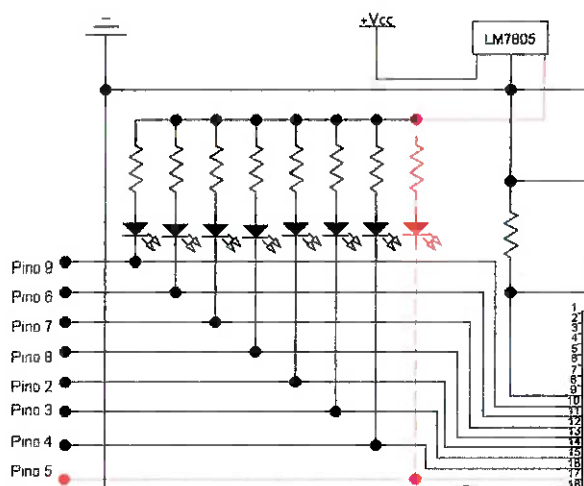


Figura 148: Acionamento através de lógica inversa (entrada do microcontrolador)

Como o pino de microcontrolador está diretamente ligado ao pino do conector, a tensão na entrada do ATME1 é zero. Enviando, dessa forma, o sinal de controle. Esta técnica é conhecida por lógica inversa.

Na saída do microcontrolador também se utilizou a lógica inversa, novamente a saída do ATME1 está em nível lógico alto. Na entrada do optoacoplador também está em 5V (pino 1). Nesta situação não há corrente circulando pelo circuito. Porém quando o microcontrolador envia uma saída, seu pino passa a ter tensão zero, com a diferença de potencial entre o ATME1 e o optoacoplador, a corrente elétrica circula pelo sistema, conforme figura a seguir:

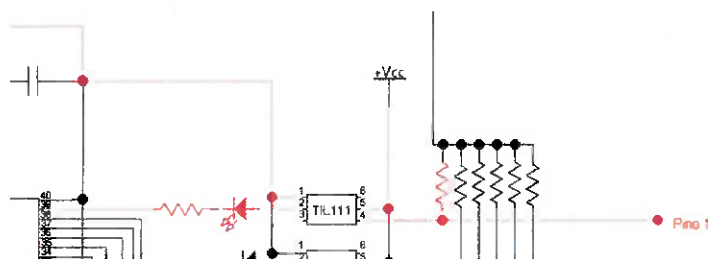


Figura 149: Acionamento por lógica inversa (saída do microcontrolador)

Ao passar corrente pelo diodo do fotoacoplador, ele emitirá luz e, dessa forma, o fototransistor permitirá a passagem de corrente pelo outro lado, esta corrente irá acionar os transistores da ponte H, localizada no módulo de potência.

Outro elemento do circuito é o *reset* do microcontrolador, esta operação garante que toda vez que o ATMEL for ligado, seu programa executa corretamente. Este circuito está representado, de forma destacada, na figura abaixo.

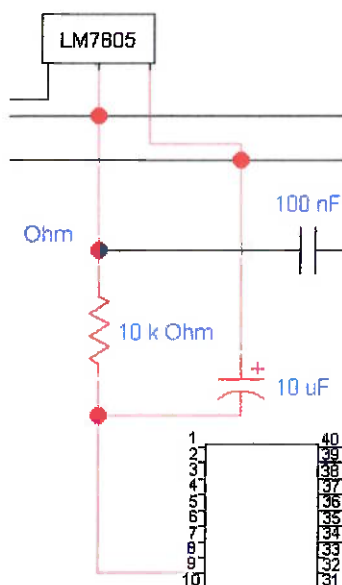


Figura 150: Circuito de *reset* do microcontrolador

4.5.9. Relação de componentes e custos

O principal componente dessa placa é o microcontrolador. Apesar dos diversos tipos de microcontroladores existentes no mercado optou-se pelo ATMEL não

devido ao custo, mas pela grande flexibilidade que este chip possui ao permitir a gravação do programa sem a necessidade de um gravador.

A Tabela 15 mostra os componentes eletrônicos utilizados na placa de comando, bem como os respectivos custos.

Tabela 15: Componentes da placa de controle

Item	Quantidade (unidade)	Preço unitário (R\$)	Preço (R\$)
Microcontrolador Atmel AT89528252	1	18,50	18,50
Soquete 40 pinos	1	1,80	1,80
Regulador de tensão LM7805	1	2,00	2,00
Cristal oscilador de 12 MHz	1	1,00	1,00
Acoplador óptico TIL111	6	1,00	6,00
Soquetes 6 pinos	6	0,28	1,68
Capacitores	4	0,10	0,40
Resistores	15	0,05	0,75
LEDs de 5 mm	14	0,10	1,40
Conector DB09 Macho	1	0,75	0,75
Conector P4	1	0,60	0,60
Placa padrão para circuito	1	7,50	7,50
Total			42,38

A placa de controle na versão final teve um custo bem próximo ao da placa de controle inicial, apesar de utilizar mais componentes. Tal fato pode ser explicado principalmente por esta placa não utilizar a placa padrão que possui um elevado custo em relação à placa para a corrosão, outro fator importante a ser considerado é a não consideração do custo da tinta fotossensível utilizada para a confecção da nova placa.

Tabela 16: Componentes da placa de controle final

Item	Quantidade (unidade)	Preço unitário (R\$)	Preço (R\$)
Microcontrolador Atmel AT89528252	1	18,50	18,50
Soquete 40 pinos	1	1,80	1,80
Regulador de tensão LM7805	1	2,00	2,00
Cristal oscilador de 12 MHz	1	1,00	1,00
Acoplador óptico TIL111	8	1,00	8,00
Soquetes 6 pinos	8	0,28	2,24
Switch 4066	1	0,50	0,50
Soquete 14 pinos	1	0,70	0,70
Capacitores	4	0,10	0,40
Resistores	3	0,05	0,15
Rede resistiva	3	1,00	3,00
LEDs de 3 mm	17	0,10	1,70
Conector DB09 Macho	1	0,75	0,75
Conector J2	2	0,60	1,20
Placa para circuito (para corroer)	1	3,50	3,50
Total			45,44

4.6. Joystick

Com o objetivo inicial de auxiliar nos testes do programa de controle, durante a sua fase de desenvolvimento, foi construído um *joystick*. O qual é conectado diretamente no módulo de controle, isto é, na placa onde está localizado o microcontrolador. Através deste *joystick* é possível realizar o controle de todos os motores e, conseqüentemente, realizar toda a movimentação do robô, bem como controlar a velocidade dos motores. A seguir é apresentada uma descrição completa do controle (*joystick*), mostrando o esquema elétrico e a relação dos pinos do conector.

Como suporte para os contatos dos botões do controle foi utilizado um *joystick* comum, de uma marca bem conhecida de videogames, o *Super Nintendo®*. Este

modelo de controle facilmente encontrado (e por um preço bem acessível) em qualquer loja de acessórios para videogames ou mesmo locadoras de jogos. A imagem a seguir mostra o controle pronto e, em detalhe, o conector.



Figura 151: Joystick utilizado para controlar o robô.

4.6.1. Esquema elétrico

O esquema elétrico do controle é muito simples, uma vez que ele é constituído apenas de fios e botões. A figura a seguir ilustra este esquema.

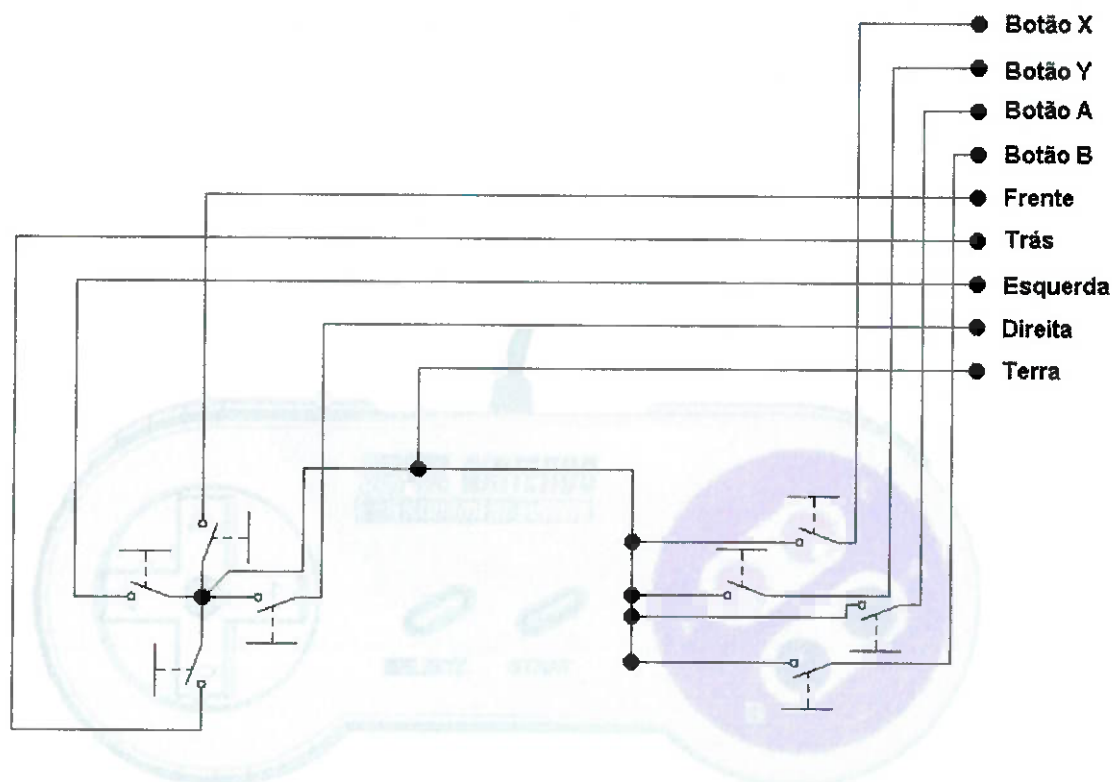


Figura 152: Esquema elétrico do joystick do robô.

Como se pode notar na Figura 152, alguns dos botões do controle não são usados, já que o número de entradas utilizadas no micro-controlador é oito e o *joystick* possui oito botões e o direcional (que pode ser considerado como quatro botões distintos). Os botões sem funcionalidade alguma foram mantidos apenas por questões estéticas.

4.6.2. Relação entre os botões e os pinos do conector

Para conectar o *joystick* ao módulo de controle é utilizado um conector do tipo DB9, o qual possui nove pinos. Cada um desses botões é associado a uma variável de comando (utilizadas no programa de controle) que, por sua vez, é responsável por executar uma ação. As ações possíveis são relacionadas, basicamente, ao acionamento dos motores. A tabela a seguir mostra a relação dos botões, pinos, variáveis e ações.

Tabela 17: Relação entre botões, pinos e variáveis de comando

BOTÃO	PINO	VARIÁVEL	AÇÃO
X	9	PWMA	Aumenta a velocidade dos motores de movimentação
Y	8	PWMB	Diminui a velocidade dos motores de movimentação
B	7	BRB	Abaixa o braço do robô (anti-horário)
A	6	BRL	Levanta o braço do robô (horário)
Frente	2	MTF	Robô se move para frente
Trás	3	MTA	Robô se move para trás
Esquerda	4	MTE	Robô se vira para esquerda
Direita	5	MTD	Robô se vira para direita

Na tabela acima não é mencionado o pino 1 do conector, pois este pino não é associado a nenhum botão em específico, ele é destinado ao terra do controle, o qual na verdade é conectado a todos os oito botões de comando.

4.7. Pontes H

4.7.1. Descrição e princípio de funcionamento

Um dos circuitos mais utilizados para o acionamento de motores é o chamado “ponte H”, que consiste de 4 transistores dispostos como na figura abaixo, onde o acionamento é feito elevando-se a tensão dos fios indicados como “Sinal: sentido 1” ou “Sinal: sentido 2”, conectados às bases dos transistores. Para cada um dos sinais acionados, temos um sentido em que o motor gira.

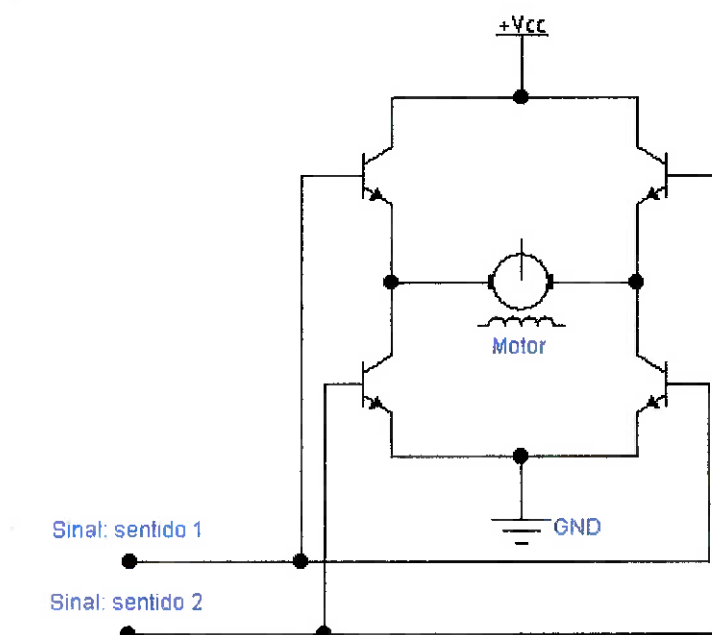


Figura 153: Ponte H genérica

É comum utilizar-se transistores de efeito de campo (MOSFETS), ao invés de transistores bipolares, uma vez que os MOSFETS apresentam melhor rendimento que os bipolares, dada a menor dissipação térmica dos mesmos.

Para a nossa aplicação, dado o requisito de baixo custo que norteou o projeto, utilizou-se transistores bipolares, uma vez que o custo deste tipo de equipamento é significativamente menor que os MOSFETS, assim como a complexidade do circuito utilizando MOSFETS é maior quando comparado ao circuito com bipolares.

4.7.2. Circuito

Com relação ao circuito básico mostrado na Figura 153, o circuito implementado mostrado na Figura 157 apresenta algumas diferenças. Primeiramente, foi adicionado um fusível de proteção de 10 A, a fim de prevenir a queima de componentes por algum curto circuito. Também se utilizou a configuração Darlington (ver figura para os transistores, utilizando um transistor BC637 e um TIP3055 (ambos NPN), sendo que esta configuração permite que o sinal de comando seja fornecido diretamente pelo CI TIL111 (optoacoplador): sabendo que os transistores TIP3055 e BC637

possuem, respectivamente ganhos de corrente iguais a h_{TIP} e h_{BC} , o “transistor equivalente” possui a seguinte característica:

$$h_{darlington} = h_{TIP} \cdot h_{BC}$$

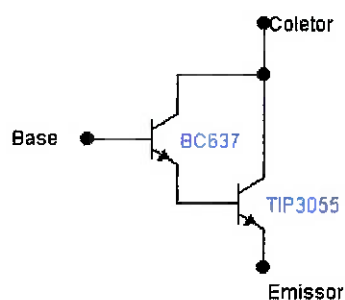


Figura 154: Configuração Darlington para transistores

Sabendo que o CI optoacoplador permite uma corrente máxima de saída de 100mA, e analisando os data-sheets dos transistores (Figura 155 e Figura 156), obtemos no pior caso:

- $h_{TIP} = 10$
- $h_{BC} = 50$

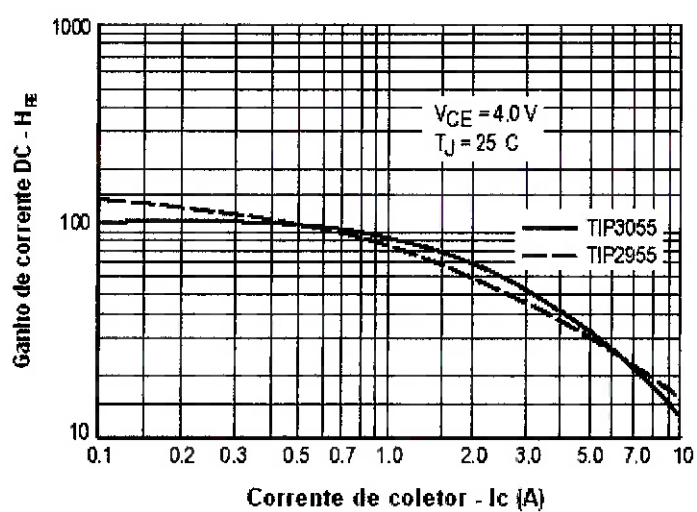


Figura 155: Ganho de corrente do transistor TIP3055

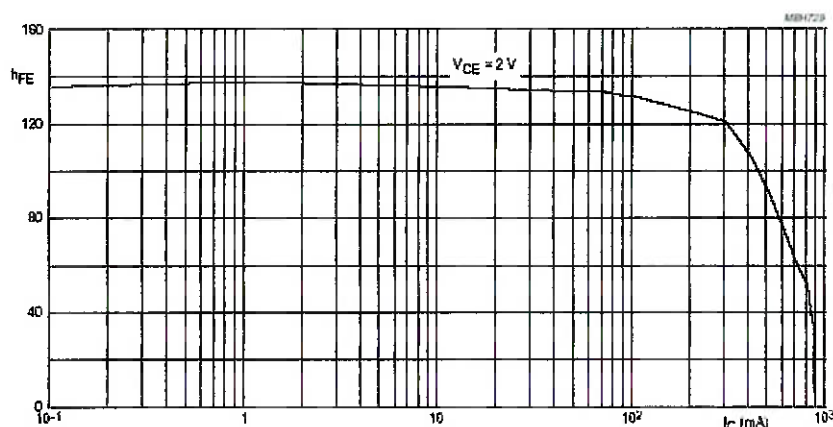


Figura 156: Ganho de corrente do transistor BC637

Isso implica que $h_{\text{darlington}}=50$ e, portanto 100mA provenientes do opto-acoplador são suficientes para suprir uma corrente de base para o transistor TIP3055 de até 5A.

Por fim, a fim de se limitar a corrente de base no transistor utilizou-se resistores de 2200Ω . O esquema elétrico encontra-se na Figura 157.

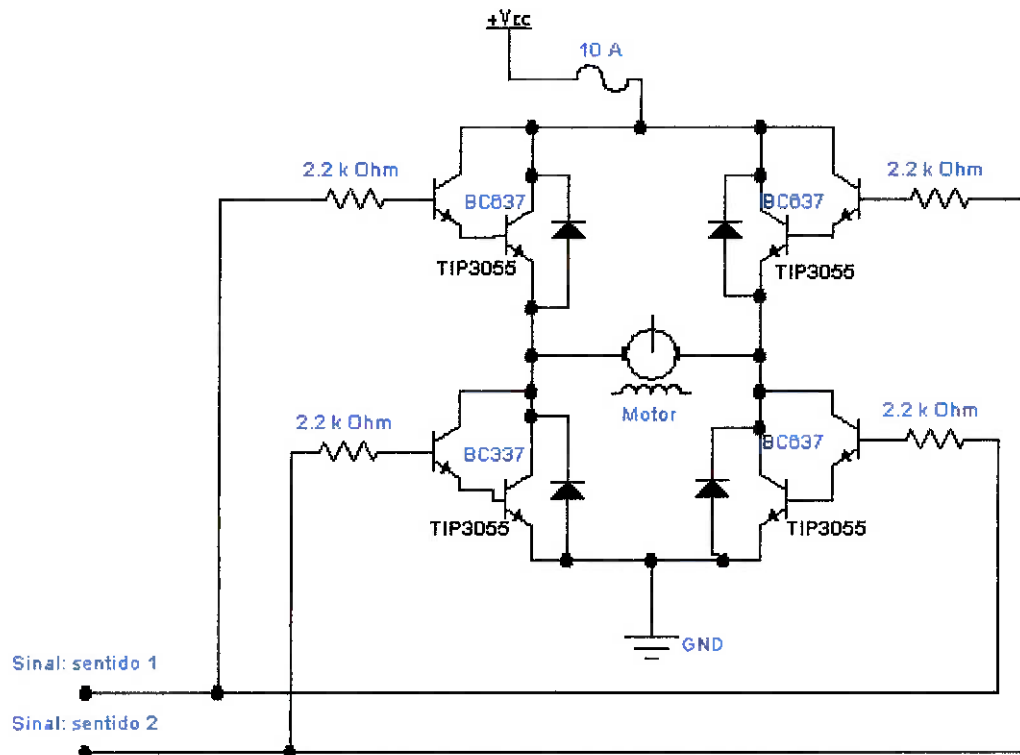


Figura 157: Esquema elétrico da ponte H

4.7.3. Componentes utilizados e circuito final

A Tabela 18 contém os componentes utilizados na construção das pontes:

Tabela 18: Materiais utilizados- ponte H

Material	Quantidade
Placa de circuito impresso	1
Transistor bipolar NPN BC637	4
Transistor bipolar NPN TIP3055	4
Resistores 2200 Ω	4
Suporte pata fusível	1
Fusível 10 A	1
Conector de 2 entradas	1
Conector de 4 entradas	1

A seguir, temos imagens da placa utilizada para a confecção do circuito (Figura 158), cujo layout foi desenhado para permitir que uma grande corrente circulasse pela placa. Na Figura 159, temos o circuito final soldado.

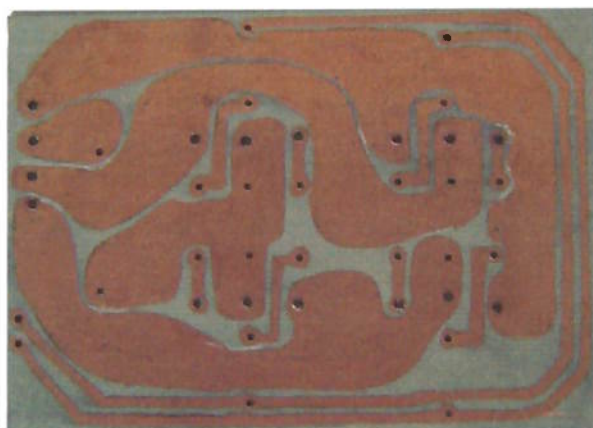


Figura 158: Placa de circuito impresso

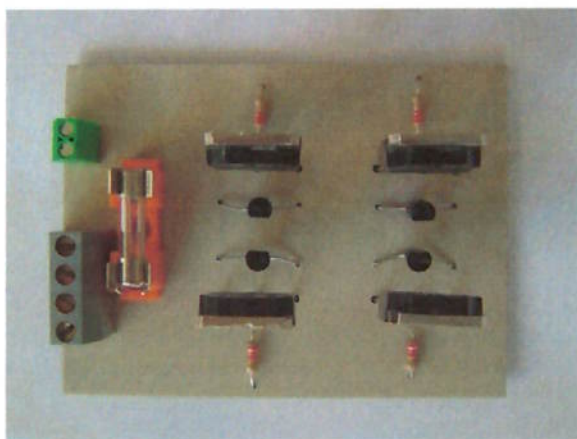


Figura 159: Ponte H final

4.7.4. Análise comparativa e custos

Para o acionamento dos motores a ponte podia ser feita basicamente de três formas:

- usando transistores bipolares;
- usando transistores de efeito de campo (MOSFETS);
- usando IGBTs.

Em princípio realizou-se um levantamento de preços comparando-se apenas os principais componentes de cada tipo de montagem.

Tabela 19: Comparativo principais formas de montagem de uma ponte H

Componentes principais	Preço unitário (R\$)	Ponte H					
		Transistor Bipolar		MOSFET		IGBT	
		Qtd.	Preço	Qtd.	Preço	Qtd.	Preço
Transistor bipolar	3,00	4	12	---	---	---	---
Transistor de efeito de campo	3,50	---	---	4	14	---	---
Gate driver	8,00	---	---	2	16	---	---
IGBT	20,00	---	---	---	---	4	80
Total			12		30		80

Durante a pesquisa de preços houve uma grande dificuldade de obter o gate driver, pois segundo as lojas este componente está em falta. No caso do IGBT percebeu-se que este componente não é muito utilizado, pois algumas lojas sequer o conheciam e também, porque as lojas que trabalham com este componente só o faziam por meio de encomenda.

A partir destes primeiros orçamentos pode-se verificar que a ponte fabricada com o transistor bipolar é a mais barata entre as opções existentes.

Tabela 20: Lista de componentes de cada ponte H

Item	Quantidade (unidade)	Preço unitário (R\$)	Preço (R\$)
Transistor bipolar NPN TIP3055	4	3,00	12,00
Transistor bipolar NPN BC637	4	0,50	2,00
Resistores 2200Ω	4	0,05	0,20
Conector de 4 entradas	1	1,20	1,20
Conector de 2 entradas	1	1,50	1,50
Fusível 10 A	1	0,20	0,20
Suporte pata fusível	1	0,60	0,60
Placa de circuito impresso	1	0,50	0,50
Total			17,70

O principal transistor dessa placa, o TIP3055, foi encontrado com uma grande variação de preços, essencialmente dependendo do fabricante do transistor. Devido a grande preocupação com o custo optou-se pelo de menor preço que, neste caso, era o que possuía o encapsulamento visualmente mais bonito.

4.8. Outro modo de acionar os motores

Uma outra forma de acionar os motores seria através da utilização de transistores de efeito de campo MOSFET's. O circuito de potência mostrado na Figura 160 é um circuito muito utilizado e consagrado.

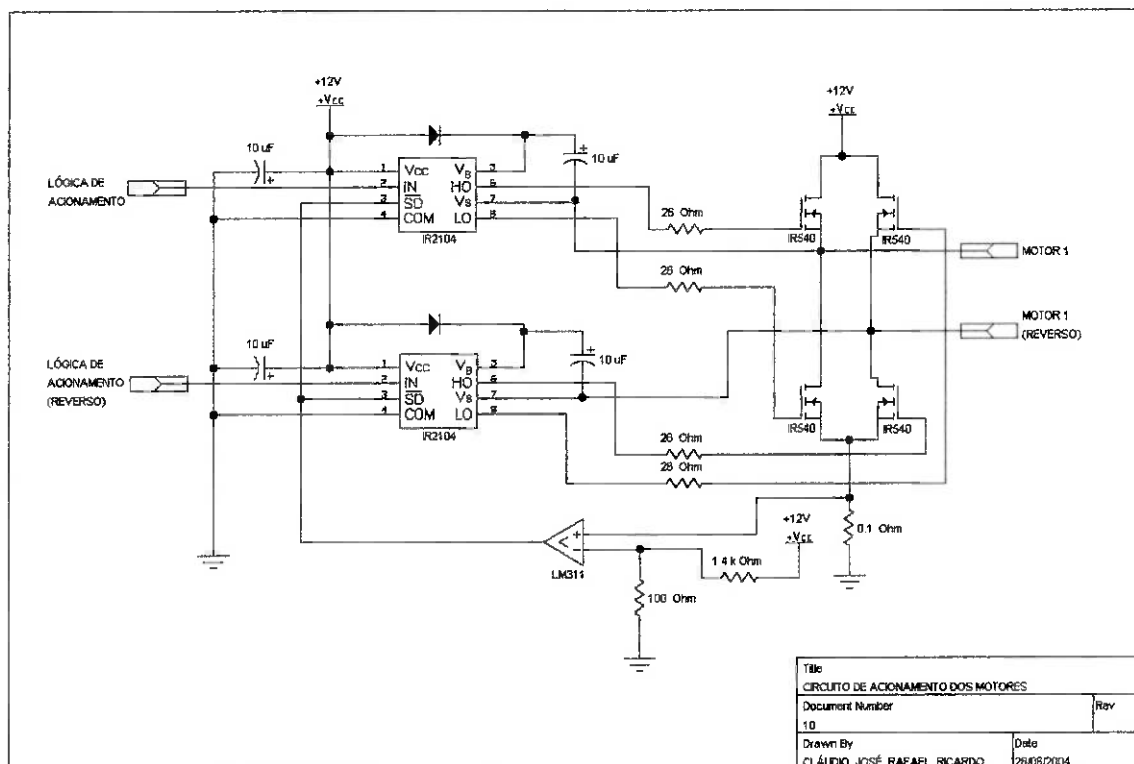


Figura 160: Circuito de potência do robô

4.8.1. Descrição dos componentes

Neste circuito estão presentes alguns componentes importantes que serão descritos a seguir:

- **Gate-Drive:** É um CI, utilizado para controlar a entrada de voltagem no MOSFET.
- **MOSFET:** É um componente, cuja função é similar ao transistor bipolar, porém apresenta a vantagem de ser controlado através de voltagem e não pela corrente como ocorre no último. Isso evita a necessidade de uma alta corrente de base, e conseqüentemente um gerador para tal corrente, o que implicaria em uma grande dissipação de potência.
- **Chopper:** Circuito utilizado para controlar a corrente que passa no motor. Este circuito tem duas funções principais no projeto: uma é

evitar que, devido a algum obstáculo, no qual o robô não possa se locomover, a corrente suba muito e danifique o motor; e, na partida, para que a corrente, durante a partida, suba gradualmente ficando dentro de uma região aceitável. A saída deste circuito é 0 quando a corrente está com um valor aceitável, e 1 quando a corrente ultrapassou o valor máximo projetado.

- *Ponte H*: A configuração dos MOSFET's em "ponte H" tem a função de permitir que o motor seja acionado nos dois sentidos.

4.8.2. Especificação dos componentes:

Gate-Drive: As especificações para este componente foram:

- Ser compatível com o MOSFET canal n ;
- Compatível com entrada lógica 5V.

Com base nestas especificações o gate-drive selecionado foi o IR-2104, pois além de as especificações do projeto, ele é um dos mais utilizados no mercado.

MOSFET: As especificações para este componente foram:

- Corrente de Dreno(I_D): 8 A
- Voltagem de Dreno(V_{DS}):12V

Com base nestas especificações o MOSFET selecionado foi o IRF-540.

Chopper: Em um circuito chopper, como o ilustrado na Figura 161, é necessário definirmos suas resistências de modo que atenda as seguintes especificações:

- Corrente de máxima: 8A;
- Tensão de alimentação (V_{cc}): 12V;
- Tensão de comparação ($V_1=V_2$): 0.8V;
- Baixo consumo de potência.

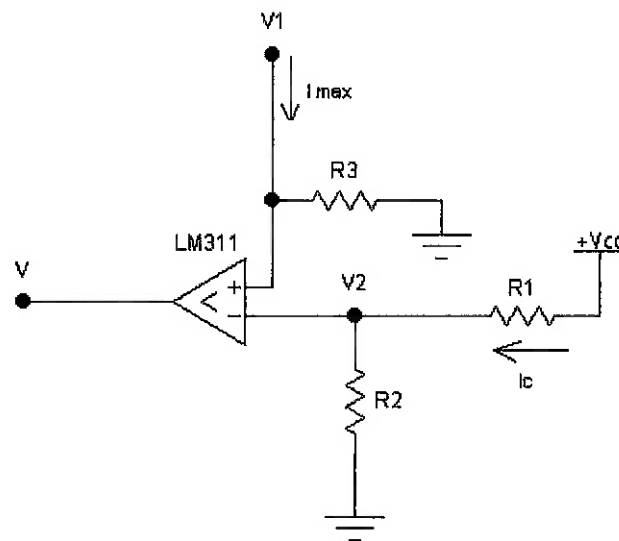


Figura 161: Circuito Chopper

Para tais valores temos as seguintes equações:

$$V_{cc} = (R_1 + R_2) \times I_c$$

$$V_{cc} - V_2 = R_1 \times I_c$$

$$V_2 = R_2 \times I_c$$

$$V_1 = R_3 \times I_{\max}$$

$$P_1 = (V_{cc} - V_2) \times I_c$$

$$P_2 = V_2 \times I_c$$

$$P_3 = V_1 \times R_3$$

Resolvendo as equações acima, temos:

$$R_1 = 1400\Omega$$

$$R_2 = 100\Omega$$

$$R_3 = 0,1\Omega$$

$$P_1 = 0,0896W$$

$$P_2 = 0,0064W$$

$$P_3 = 6,4W$$

$$P_t = 6,496W$$

onde:

P_1, P_2, P_3 , são as potências dissipadas, respectivamente, nos resistores 1, 2 e 3;

P_t , é a potência total dissipada.

Outras definições: Para especificarmos completamente o circuito de potência, precisamos definir as resistências que se localizam entre o gate-drive e o MOSFET, que está ilustrada na Figura 162 . Esta resistência tem como finalidade controlar a voltagem no gate do MOSFET (V_{GS}). Portanto para a especificação destas resistências é necessário analisar a Figura 163, onde podemos obter o V_{GS} , através da corrente no gate (I_D).



Figura 162: Gate drive e MOSFET

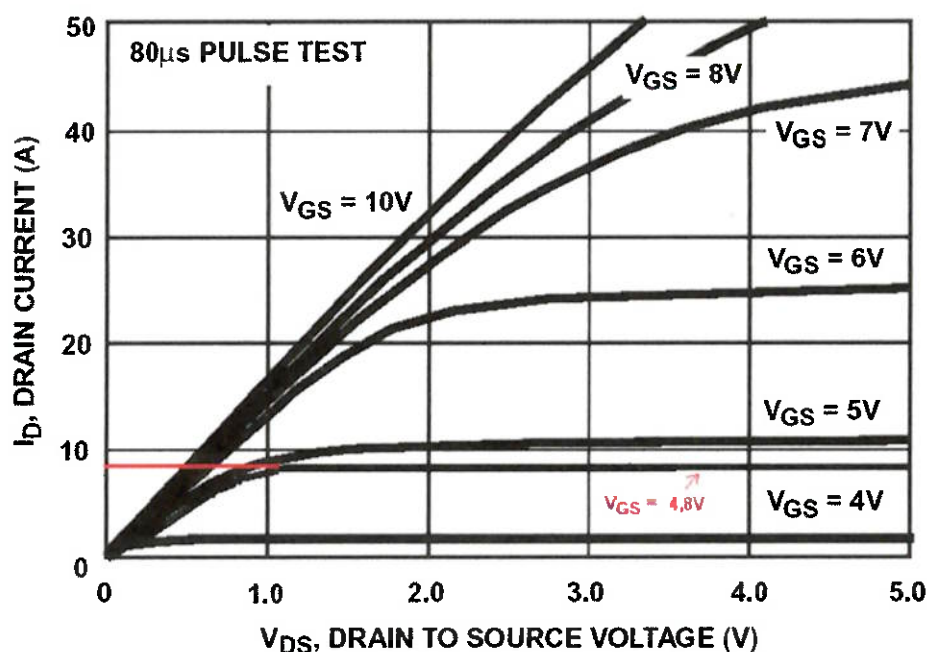


Figura 163: Características de saturação do MOSFET

Sabendo-se:

- Voltagem de saída do gate-drive (V_1): 12V;
- Corrente de saída do gate-drive (I): 0,270 A

Portanto, para definirmos a resistência basta resolver a simples equação:

$$V_1 - V_{GS} = R \times I$$

Que resulta em: $R = 26\Omega$

4.9. Circuito conversor RS232 – TTL

4.9.1. Descrição

Para que fosse possível realizar o controle do robô utilizando-se um PC comum, optou-se por utilizar a porta serial do PC, através do protocolo de comunicação RS232.

O protocolo de comunicação RS232 é um protocolo de comunicação que possui os seguintes sinais padrão:

- TXD: dados transmitidos pelo terminal;
- RXD: dados enviados pelo terminal;
- RTS: requisição de envio;
- CTS: permissão de envio;
- DSR: dados prontos;
- DCD: detecção de portadora;
- DTR: terminal de dados pronto.

Para nossos propósitos, utilizaremos comunicação serial assíncrona, e somente os pinos Tx e Rx serão implementados, uma vez que apenas interessa comandos oriundos do computador em direção ao robô.

Este protocolo utiliza os seguintes níveis de tensão para envio de dados:

Tabela 21: Níveis de tensão RS232 e TTL

Tensão	Nível lógico
+ 5 a +15V	0
-5 a -15V	1

Nota-se, portanto que este padrão é diferente do padrão TTL, o que implica na necessidade da conversão do sinal para os níveis 0V (para nível lógico 0) e +5V (para nível lógico 1). Para tal, utilizou-se um CI que realiza esta tarefa: o MAX232. O esquema elétrico completo do circuito encontra-se abaixo.

4.9.2. Circuito

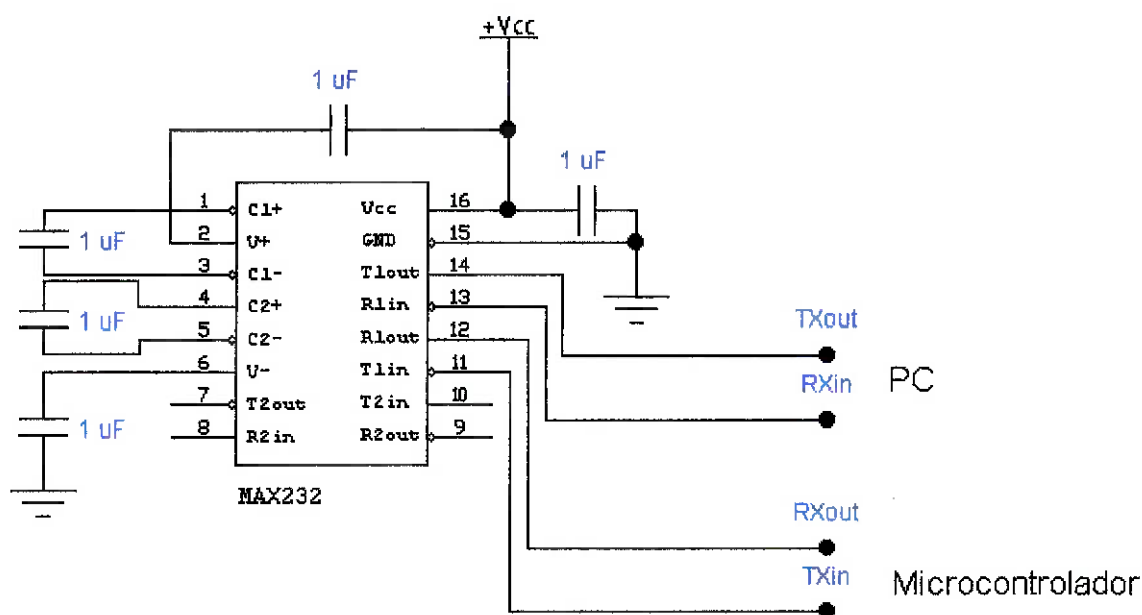


Figura 164: Esquema elétrico do circuito conversor RS232-TTL

O papel do CI MAX232 é converter o sinal oriundo da porta serial do micro nos níveis de tensão 0 a +5V, a fim de serem utilizados pelo microcontrolador. Sendo assim, temos abaixo plotadas as curvas de tensão para os canais Rx e Tx, onde se nota que em resumo o MAX232 funciona como uma porta inversora e um amplificador de tensão.

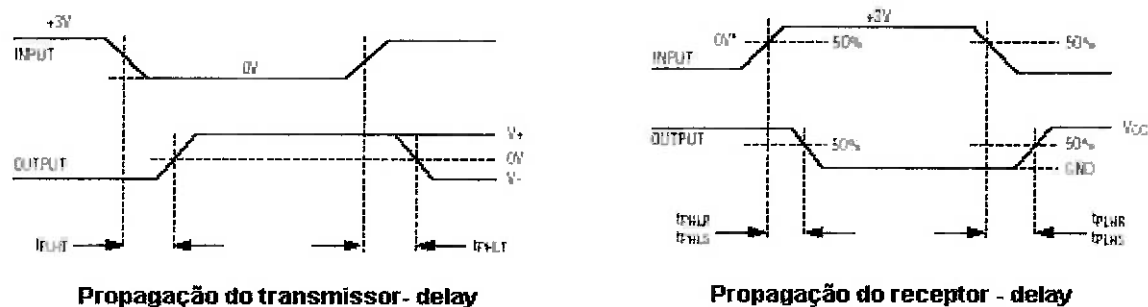


Figura 165: Curvas de tensão MAX232

4.9.3. Componentes utilizados, custos e circuito final

Para a confecção da placa conversora, foram utilizados os seguintes componentes:

Tabela 22: Componentes utilizados circuito conversor

Item	Quantidade (unidade)	Preço unitário (R\$)	Preço (R\$)
Circuito integrado MAX232	1	2,70	2,70
Soquete 16 pinos	1	0,84	0,84
Regulador de tensão LM7805	1	2,00	2,00
Conector DB09 Macho	2	0,75	1,50
Redutor de tensão LM7805	1	2,00	2,00
Capacitor de 1uF	5	0,10	0,50
Conector P4	1	0,60	0,60
Placa de circuito impresso	1	0,50	0,50
Total			10,64

Para este conversor o circuito integrado MAX232 mostrou-se mais viável, por ser bem mais barato do que o MAX233, cuja estimativa de preço era de R\$15,00, e por ser bem mais fácil de encontrar, já que o MAX233 estaria disponível só sob encomenda.

Uma foto do circuito pronto pode ser vista na Figura 166:

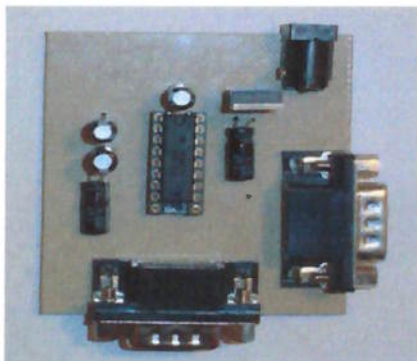


Figura 166: Circuito conversor RS232-TTL implementado

4.9.4. Testes integrados

Depois de montados os módulos da parte elétrica foram testados separadamente e todos apresentaram resultados satisfatórios. Após esta primeira avaliação do hardware partiu-se para uma nova fase de ensaios, desta vez com os módulos ligados.

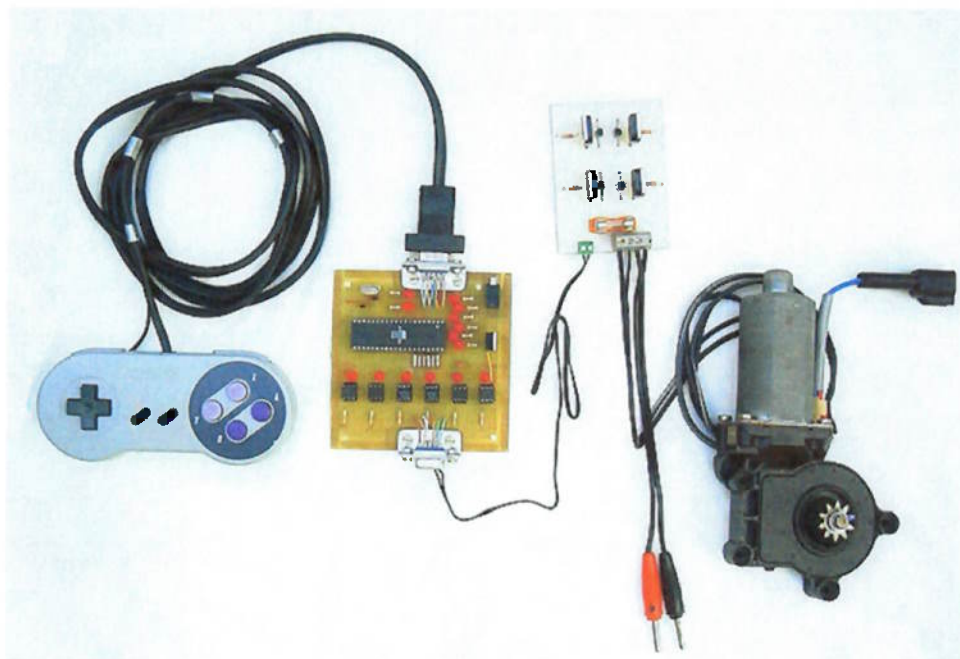


Figura 167: Ligação para o teste do conjunto

Apesar de tudo funcionar percebeu-se que o sistema não trabalhava como o esperado. Os principais indícios para tal conclusão foram o motor girando mais devagar e o rápido aquecimento do transistor TIP3055, mesmo com o motor descarregado. A partir destes sinais e de algumas medições de tensões notou-se que o transistor TIP3055 estava operando em regime linear.

A primeira tentativa de resolução deste problema foi o redimensionamento do resistor (R1 mostrado na Figura 168) que limita a corrente de base do Transistor BC637 de forma a aumentar sua corrente de base, porque se notou que a tensão do sinal de comando estava bem abaixo do esperado devido a grande queda de tensão no transistor do optoacoplador TIL111. Após novos testes observou-se que o motor passou a rodar ainda mais lentamente, a corrente de base do BC637 não sofreu modificação e que a queda no transistor do acoplador óptico aumentou. Apesar da primeira tentativa não ter resolvido o problema ela ajudou a esclarecer a real causa do mau funcionamento.

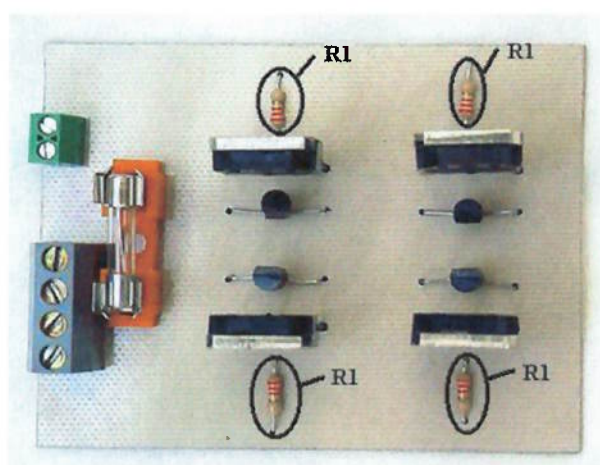


Figura 168: Ponte H, em destaque resistores substituídos

A análise de todos os dados obtidos levou a suspeita de que o LED do acoplador óptico não estava com o seu brilho total. Para a resolução do problema redimensionou-se o resistor que limita a corrente de entrada do optoacoplador, tal redimensionamento foi realizado com base na queda de tensão efetiva gerada pelos LEDs em série, portanto o resistor (R2 mostrado na Figura 169) passou de 330 Ω para 150 Ω , dessa forma permitindo a passagem da corrente máxima suportada pelo

ATMEL A nova série de testes mostrou que a mudança melhorou bastante o funcionamento do sistema.

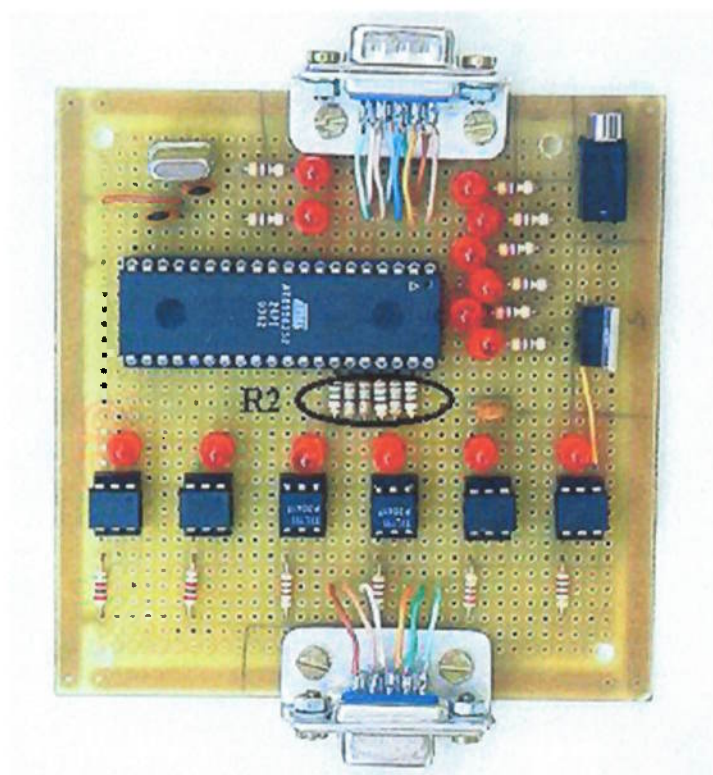


Figura 169: Placa de controle

A Tabela 23 tem a finalidade de mostrar a influência da tensão de alimentação do acoplador óptico na resposta da ponte H. Todos os dados da tabela foram obtidos com a tensão de alimentação da ponte H fixada em 12,0 V.

Pela tabela é possível observar que para as condições inicialmente esperadas, a de alimentação do optoacoplador com 12 V, a tensão aplicada no motor praticamente dobrou em relação à tensão inicial, mostrando que o ajuste levou a uma grande melhora no sistema. Porém, em relação à condição de teste da ponte H isoladamente, a tensão aplicada ao motor ainda continua abaixo do esperado, porque ela era de 10,3 V para a ponte isolada e no conjunto ficou com apenas 8,35 V, o que revela que ainda existem pontos a serem melhorados.

Tabela 23: Comparação entre a performance inicial e final

Tensão de alimentação do optoacoplador (V)	Resistor R2 de 330 Ω (inicial)		Resistor R2 de 150 Ω	
	Tensão no motor (V)	Queda entre Coletor e emissor no transistor do optoacoplador (V)	Tensão no motor (V)	Queda entre Coletor e emissor no transistor do optoacoplador (V)
10,4	4,50	3,77	7,50	0,37
12,0	4,77	4,70	8,35	0,60
14,5	4,90	7,00	9,90	1,16

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE MELHORIAS FUTURAS

5.1. Resultados dos testes do protótipo

Os testes do protótipo mostraram que mecanicamente ele desempenha bem a função para o qual o mesmo foi projetado, subindo degraus com certa facilidade e apresentando boa manobrabilidade.

No que se refere aos circuitos de potência, as pontes H mostraram relativo aquecimento bem como excessiva queda de tensão até a entrada do motor, o que denota que provavelmente os transistores não estão trabalhando na região de corte e saturação.

De modo geral, os resultados obtidos foram excelentes, considerando as limitações orçamentárias e limitações de ferramental disponível, sendo possível a construção de um equipamento que pode ter muitas aplicações em diversas áreas.

5.2. Sugestões de melhorias

Alguns pontos do projeto precisam ser revistos, dentre os quais:

- Realização de um trabalho de alívio de peso no robô (utilizando geometrias mais otimizadas e materiais poliméricos em larga escala), a fim de poupar baterias e tornar sua dirigibilidade ainda melhor;
- Avaliar melhor a faixa de operação dos motores e com isso forçar os transistores dos circuitos de potência a trabalharem na região de corte e saturação, através da adequação do resistor de base das pontes H. Com isso, os circuitos dissiparão menor potência e a queda de tensão será menor, favorecendo o desempenho e dando mais autonomia ao mesmo;
- Utilização de baterias mais modernas como, por exemplo, NiMH ou mesmo Íon Lítio, que são mais leves e duráveis que as de chumbo-ácido aqui utilizadas.

Como sugestões para uma eventual continuidade deste trabalho, pode-se citar implementação de um comando wireless (via computador ou não), a fim de aumentar a usabilidade do mesmo. Também se pode citar a utilização de encoders nos eixos do motor, a fim de que o mesmo mantenha uma trajetória mais consistente, não sofrendo desvios por causa de diferenças inerentes ao processo de fabricação dos motores. A utilização de um microcontrolador com saídas PWM facilitaria a programação.

Também é possível implementar dispositivos de monitoramento tais como câmeras, sensores infravermelho ou mesmo um pequeno manipulador com o intuito de realizar tarefas relacionadas a inspeção.

6. BIBLIOGRAFIA

6.1. Livros

1. JUVINALL, R. C; MARSHEK, K. M., *Fundamentals of Machine Component Design*, 2.ed Nova Yorque: John Wiley & Sons, 1991.
2. NIEMANN, G., *Elementos de Máquinas* Volume 1, 6.ed São Paulo: Edgard Blücher, 1971

3. BHONSLE, S. R.; Weinmann K. J., *Mathematical Modeling for Design of Machine Components*, 1.ed New Jersey: Prentice Hall, 1999
4. SHIGLEY, J. E., *Mechanical engineering design*, 6.ed New York: McGraw-Hill, 2002
5. SEDRA, A.; KENNETH C. S. *Microeletrônica*, São Paulo : Makron Books, 1995
6. CIPELLI, A. M.; MARKUS, ;SANDRINI, W. Teoria e Desenvolvimentos de Projetos de Circuitos Eletrônicos, 19.ed São Paulo: Editora Érica, 2002

6.2. Internet

1. <http://www.irobot.com>
2. <http://www.nsk.com.br>
3. www.dupont.com
4. www.motron.com.br
5. www.sew.com.br
6. www.ribermak.com.br/rolamentos/
7. www.siemens.com.br
8. www.national.com
9. www.philips.com
10. www.motorola.com
11. www.bibvirt.futuro.usp.br

6.3. Catálogos de fabricantes

1. Catálogo de correias e polias Schneider (2003)
2. Catálogo de correias e polias Gates (2004)
3. Catálogo de rolamentos NSK (1998)
4. Catálogo de rolamentos SKF (2000)

6.4. Programas

1. MATLAB v.6.0
2. Microstation v.7.01
3. Cosmos Design Star v.3.0

ANEXO A - CÓDIGO FONTE DO PROGRAMA DO MICROCONTROLADOR

```

,*****
; SOFTWARE:ProView *
; PROGRAMA:Software de controle do robô *
; VERSÃO:1.0 *
; PROGRAMADOR: Cláudio / José Roberto / Ricardo *
; DATA:07/12/04 *
; MICROCONTROLADOR: AT 89S8252 *
; CLOCK: 12MHz *
,*****
;
,*****
; COMENTÁRIO:
; Este programa controla a velocidade de movimentação do
; robô, através de um controle via PWM, onde a mudança de largura
; de pulso é feita pelos botões START e SELECT do controle.
;
,*****
;
; DEFINE VARIÁVEIS
;
,*****
; Definir constantes:

;saidas
M1F EQU P0.0 ;define P0.0 como LED1 (LED1 = P0.0)
M1A EQU P0.1 ;define P0.1 como LED2 (LED1 = P0.1)
M2F EQU P0.2 ;define P0.2 como LED3 (LED1 = P0.2)
M2A EQU P0.3 ;define P0.3 como LED4 (LED1 = P0.3)
BRS EQU P0.4 ;define P0.0 como LED1 (LED1 = P0.0)
BRD EQU P0.5 ;define P0.1 como LED2 (LED1 = P0.1)
LED1 EQU P0.6 ;define P0.2 como LED3 (LED1 = P0.2)
LED2 EQU P0.7

; entradas

```

```

BRL EQU P3.7           ;define P2.0 como S1
BRB EQU P3.6           ;define P2.1 como S2
MTF EQU P3.0           ;define P2.2 como S3
MTA EQU P3.1           ;define P2.2 como S3
MTE EQU P3.2           ;define P2.2 como S3
MTD EQU P3.3           ;define P2.2 como S3
PWMA EQU P3.4          ;define P2.2 como S3
PWMD EQU P3.5

```

```

;*****

```

```

CHAVES EQU 20H          ;habilita o registrador de bit endereçável
ALTO EQU 30H
BAIXO EQU 31H

```

```

;*****

```

```

;

```

```

;configura

```

```

MOV CHAVES,#0FFH        ;carrega valor default (1) para primeiro ciclo de funcionamento

```

```

    MOV    96H,#18H      ;habilita a E2PROM
; MOV     DPTR,#0000H    ;endereça memória
; CALL    LE_E2PROM      ;chama leitura de memória
    MOV    ALTO,#90      ;carrega valor gravado para o registrador
; MOV     DPTR,#0001H
; CALL    LE_E2PROM
    MOV    BAIXO,#170
; MOV     96H,#18H

```

```

;*****

```

```

;PROGRAMA PRINCIPAL

```

```

OUTRA:    JB     MTF,OUTRB
          DJNZ    R0,$
          JB     MTF,OUTRB
          CLR     M1F

```

```

        CLR      M2F                      ;indica quanto de potencia o pwm esta mandando
para carga
        MOV      R1,ALTO                  ;tempo que a carga fica ligada
        CALL     TEMPOB                   ;liga temporizador
        SETB     M1F
        SETB     M2F
        MOV      R1,BAIXO                 ;tempo que a carga permanece desligada
        CALL     TEMPOB                   ;liga temporizador
        CALL     CHAVE1
        JMP      OUTRA

OUTRB:   JB      MTA,OUTRC
        DJNZ     R0,$
        JB      MTA,OUTRC
        CLR      M1A
        CLR      M2A                      ;indica quanto de potencia o pwm esta mandando para carga
        MOV      R1,ALTO                  ;tempo que a carga fica ligada
        CALL     TEMPOB                   ;liga temporizador
        SETB     M1A
        SETB     M2A                      ;indica que a carga esta desligada
        MOV      R1,BAIXO                 ;tempo que a carga permanece desligada
        CALL     TEMPOB                   ;liga temporizador
        CALL     CHAVE1
        JMP      OUTRB

OUTRC:   JB      BRB,OUTRD
        DJNZ     R0,$
        JB      BRB,OUTRD
        CLR      BRD                      ;indica quanto de potencia o pwm esta mandando para carga
        JNB      BRB,$
        SETB     BRD

OUTRD:   JB      BRL,OUTRE
        DJNZ     R0,$
        JB      BRL,OUTRE
        CLR      BRS
        JNBBRL,$
        SETB     BRS

```

```

OUTRE:      JB      MTE,OUTRF
            DJNZ     R0,$
            JB      MTE,OUTRF
            CLR      M1A
            CLR      M2F          ;indica quanto de potencia o pwm esta mandando para carga
            MOV      R1,ALTO          ;tempo que a carga fica ligada
            CALL     TEMPOB          ;liga temporizador
            SETB     M1A
            SETB     M2F          ;indica que a carga esta desligada
            MOV      R1,BAIXO        ;tempo que a carga permanece desligada
            CALL     TEMPOB          ;liga temporizador
            CALL     CHAVE1
            JMP      OUTRE

OUTRF:      JB      MTD,OUTRG
            DJNZ     R0,$
            JB      MTD,OUTRG
            CLR      M1F
            CLR      M2A          ;indica quanto de potencia o pwm esta mandando para carga
            MOV      R1,ALTO          ;tempo que a carga fica ligada
            CALL     TEMPOB          ;liga temporizador
            SETB     M1F
            SETB     M2A          ;indica que a carga esta desligada
            MOV      R1,BAIXO        ;tempo que a carga permanece desligada
            CALL     TEMPOB          ;liga temporizador
            CALL     CHAVE1
            JMP      OUTF
OUTRG: JMP      OUTRA

```

```

,*****

```

```

CHAVE1:     JB      PWMA,LIMPA1      ;Aumenta: Testa a chave
            JNBCHAVES.0,CHAVE2      ;testa flag
            DJNZ     R0,$            ;Decrementa variável
            JB      PWMA,LIMPA1      ;Confirma chave ligada
            CLR      CHAVES.0        ;seta o flag

            MOV      A#250           ;move valor para acumulador para comparar

```

```

    CJNE    A,ALTO,AMT                ;Só continua quando a chave voltar nível 0
confirmando que a chave ja foi desligada.
    JMP     OUTR                      ;retorna para rotina do pwm

AMT:  CLR   LED2                    ;acende led para indicar que o flag foi acionado(tecla acionada)
      MOV   A,#20                   ;incrementa o valor mínimo
      ADD   A,ALTO
      MOV   ALTO,A

      MOV   A,BAIXO                 ;decrementa o valor máximo
      SUBB  A,#20
      MOV   BAIXO,A

      JMPOUTR ;

CHAVE2: JB   PWMD,LIMPA2             ;Diminui: Testa a chave
      JNBCHAVES.1,OUTR              ;testa flag
      DJNZ  R0,$                    ;Decrementa variável
      JB   PWMD,LIMPA2              ;Confirma chave ligada
      CLR   CHAVES.1                ;seta o flag
      MOV   A,#90
      CJNE  A,ALTO,DMN              ;Só continua quando a chave voltar nível 0
confirmando que a chave ja foi desligada.
      JMP   OUTR

DMN:  CLR   LED2
      MOV   A,#20                   ;Decrementa o valor mínimo
      ADD   A,BAIXO
      MOV   BAIXO,A

      MOV   A,ALTO                 ;incrementa o valor máximo
      SUBB  A,#20
      MOV   ALTO,A                 ;acende led para indicar que acionou chave de
gravacao

OUTR: RET

TEMPOB: NOP
TEMPB:  MOV  R2,#35

```

```

TEMB: NOP                                ;determina a frequência do pwm
    DJNZ    R2,TEMB
    DJNZ    R1,TEMPB
    RET

LIMPA1:    SETB  CHAVES.0                ;limpa as flags e apaga o led de indicação de
tecla acionada
    SETB    LED2
    JMPCHAVE2
LIMPA2:    SETB  CHAVES.1
    SETB    LED2
    JMPOUTR

;~~~~~
;          SUBROTINAS
;-----
;Conta um tempo
;
;obs: para que essa rotina de tempo funcione corretamente o registrador R1 tem que vir com um valor
;já determinado pelo programador.

TEMPO:     NOP                          ;Temporização com três temporizadores
TEMP: MOV   R3,#0FFH
TEMP1: MOV  R2,#0FFH
    DJNZ    R2,$
    DJNZ    R3,TEMP1
    DJNZ    R1,TEMP                    ;determina a quantidade de vezes
    RET

;SUBROTINAS
TEMPOS:     MOV   R1,#0FFH              ;Temporização com dois temporizadores
TEMPO2:     MOV   R2,#0FFH
TEMPO1:     NOP
    DJNZ    R2,TEMPO1
    DJNZ    R1,TEMPO2
    RET

LE_E2PROM:                                ;rotina de leitura de memoria E2PROM
    MOVX    A,@DPTR

```

```
CALL    TEMPOS
RET
```

GRAVA_E2PROM:

;rotina de escrita em memoria E2PROM

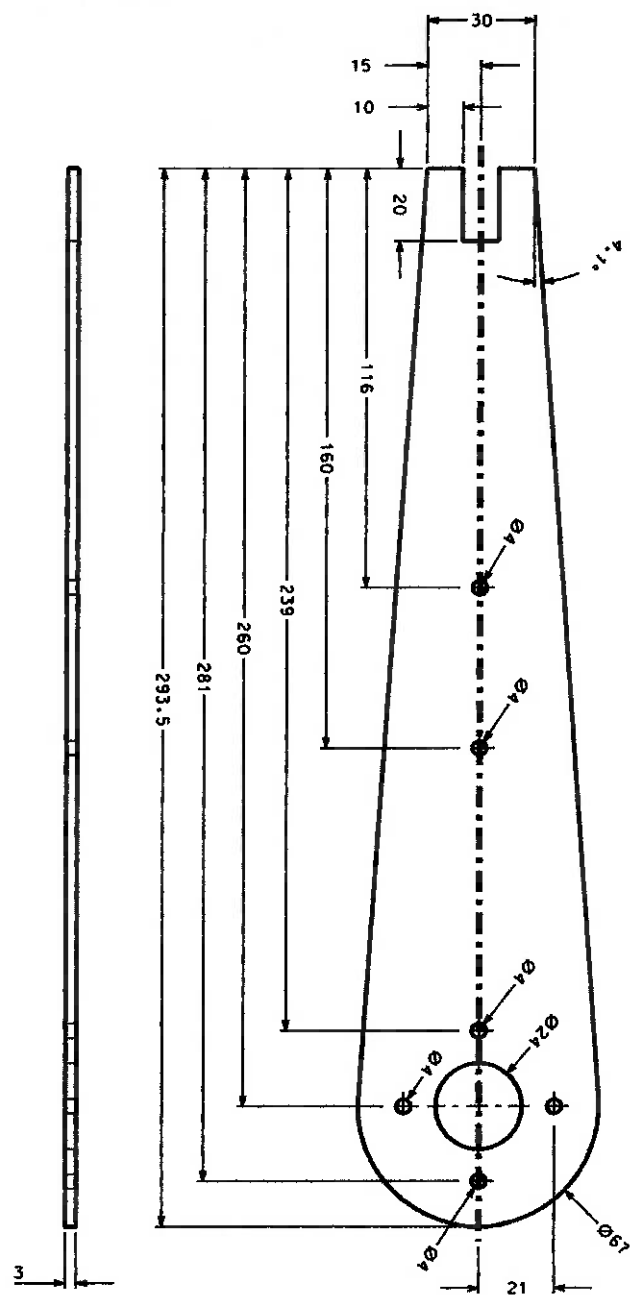
```
MOV     DPTR,#0000H
MOV     A,ALTO
MOVBX   @DPTR,A
CALL    TEMPOS
MOV     DPTR,#0001H
MOV     A,BAIXO
MOVBX   @DPTR,A
CALL    TEMPOS
```

```
RET
```

```
END
```

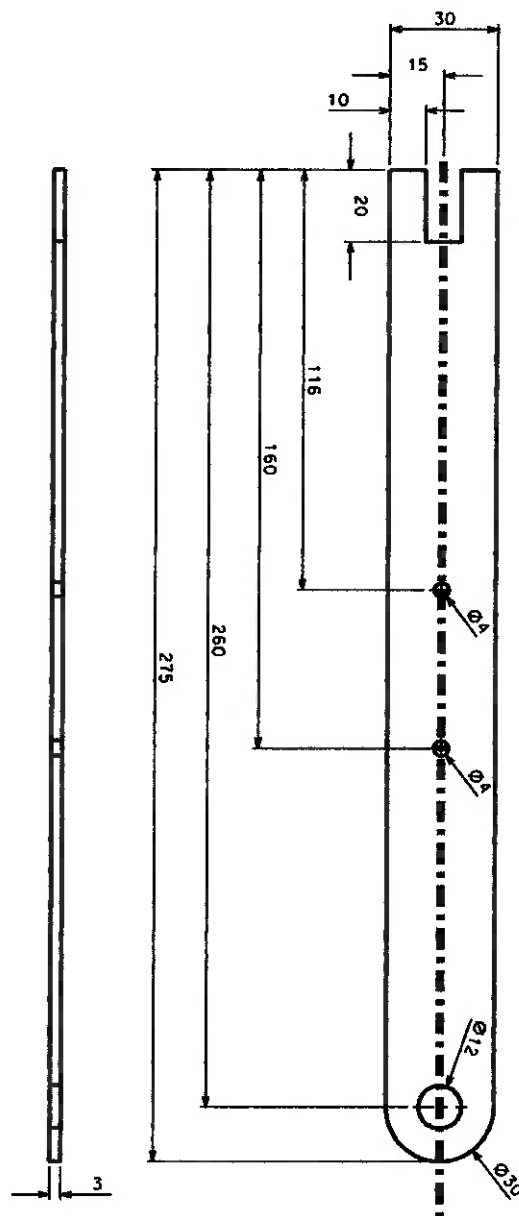
ANEXO B - DOCUMENTAÇÃO MECÂNICA

Nesta seção, encontram-se os desenhos técnicos de todas as peças que fazem parte do robô.



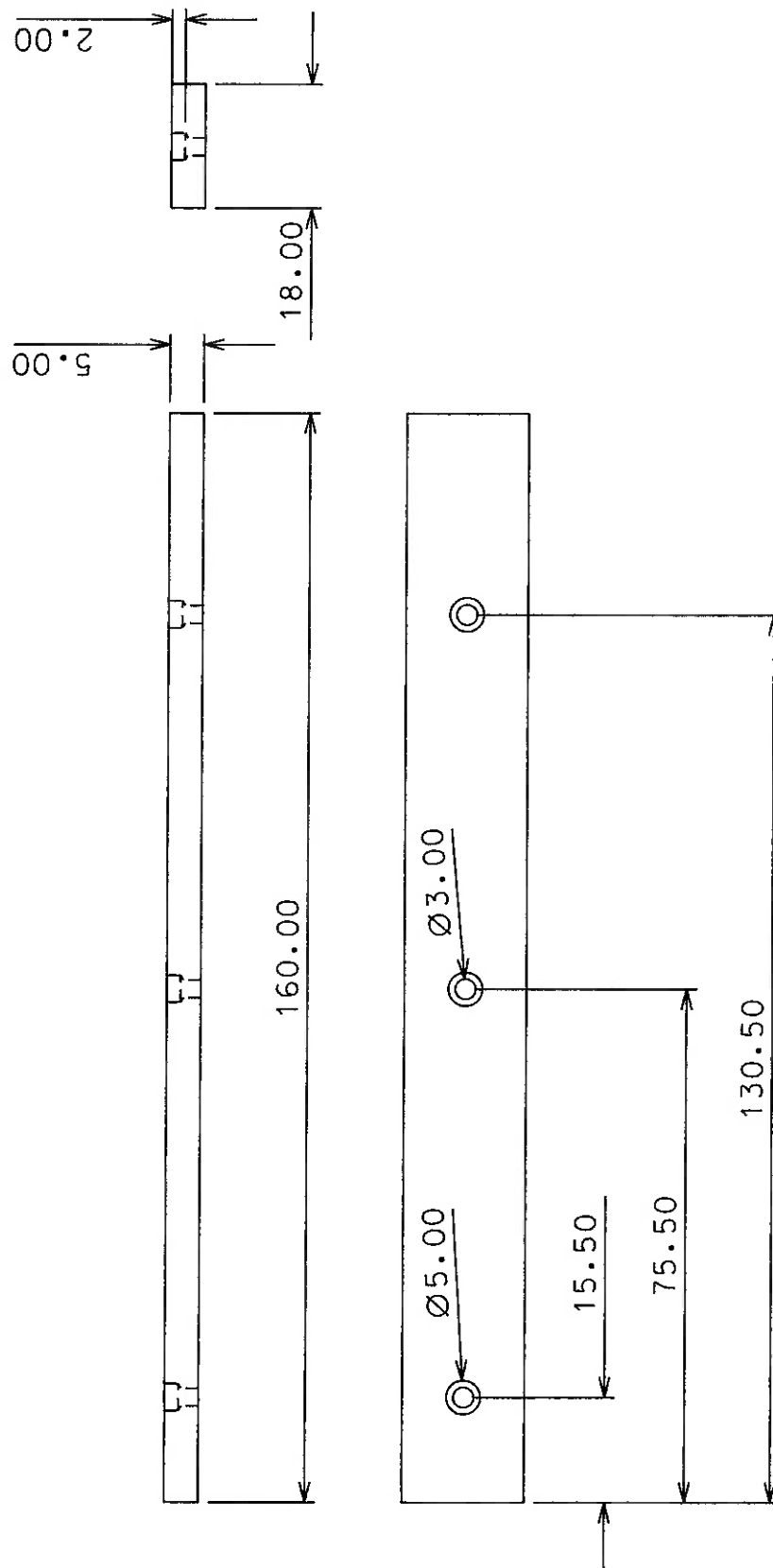
Material: Alumínio
Tolerancia geral: 0.1mm

Escola	Universidade de Sao Paulo - Escola Politecnica		
Disciplina	Projeto de Conclusao de Curso		
Projeto	Robo de Busca		Peca Estrutura braco interno
Autor	Jose Robarto Moreno Junior		
04/11/2004	Escala: 1:2	Versao 2	

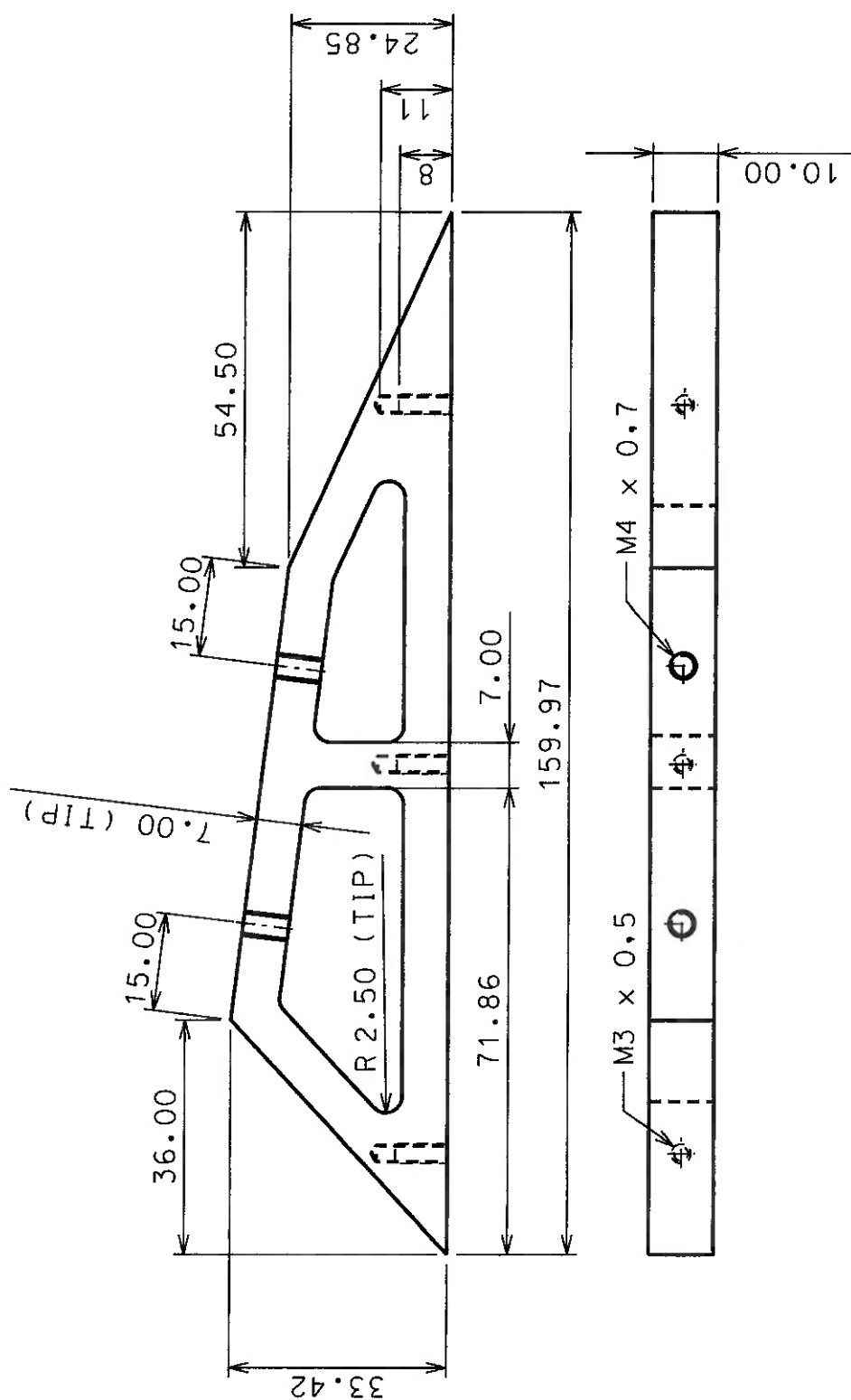


Material: Alumínio
Tolerancia geral: 0.1mm

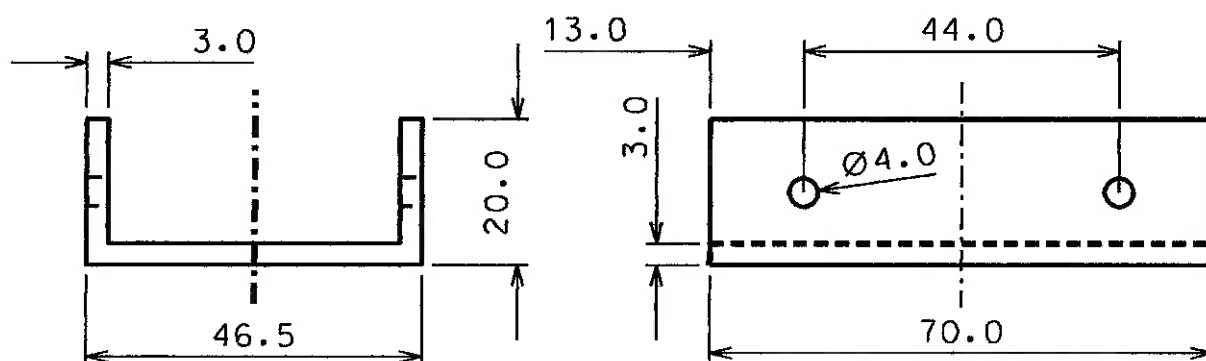
Escola	Universidade de Sao Paulo - Escola Politecnica		
Disciplina	Projeto de Conclusao de Curso		
Projeto	Robo de Busca		Peca Estrutura braco externo
Autor	Jose Roberto Moreno Junior		
04/11/2004	Escala 1:1	Versao 2	



Escola	Universidade de Sao Paulo - Escola Politecnica		
Disciplina	Projeto de Conclusao de Curso		
Projeto	Robo de Busca		Peca Pastilha da Guia Dianteira
Autor	Claudio Massumi Oda Nishimura		
26/11/2004	Escala 1:1	Versao 3	

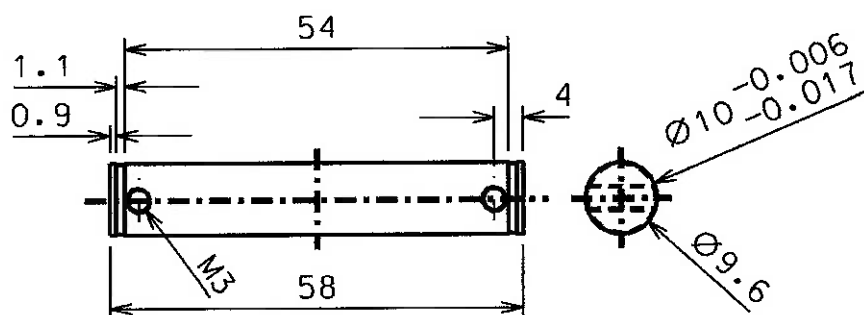


Escola	Universidade de Sao Paulo - Escola Politecnica		
Disciplina	Projeto de Conclusao de Curso		
Projeto	Robo de Busca		Peca Suporte da Guia Dianteira
Autor	Claudio Massumi Oda Nishimura		
07/12/2004	Escala 1:1	Versao 3	



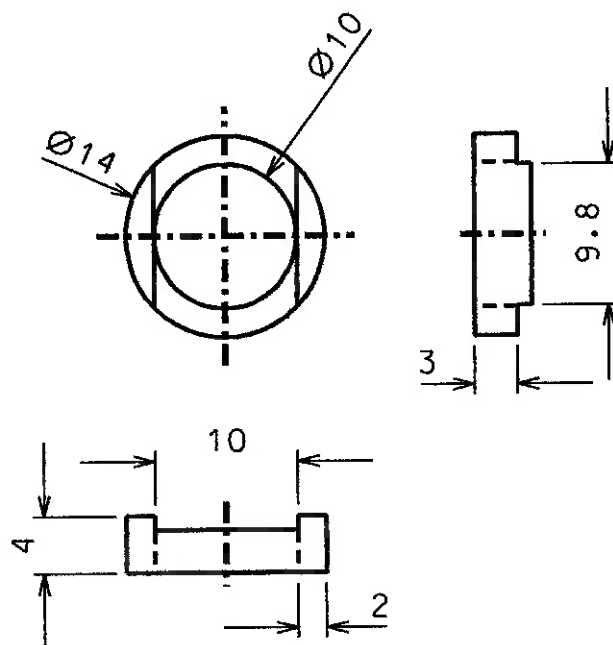
Material: Alumínio
Tolerância geral: 0.1mm

Escola	Universidade de Sao Paulo - Escola Politecnica		
Disciplina	Projeto de Conclusao de Curso		
Projeto	Robo de Busca		Peca
Autor	Jose Roberto Moreno Junior		Cantoneira
04/11/2004	Escala 1:1	Versao 1	braco



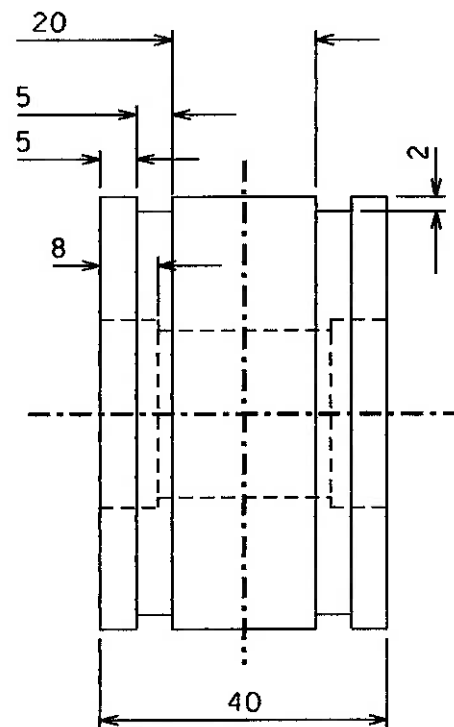
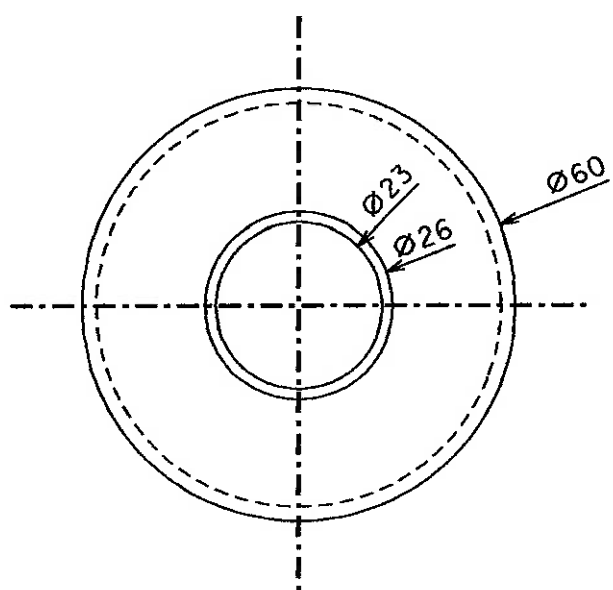
Material: aco 1020
Tolerancia geral: 0,1mm

Escola	Escola Politecnica da Universidade de Sao Paulo		
Disciplina	Projeto de conclusao de curso		
Projeto	Robo para inspecao		Peca: Eixo do braco
Autor	Jose Roberto M. Jr.		
15/11/2004	Escala 1:1	Versao 01	

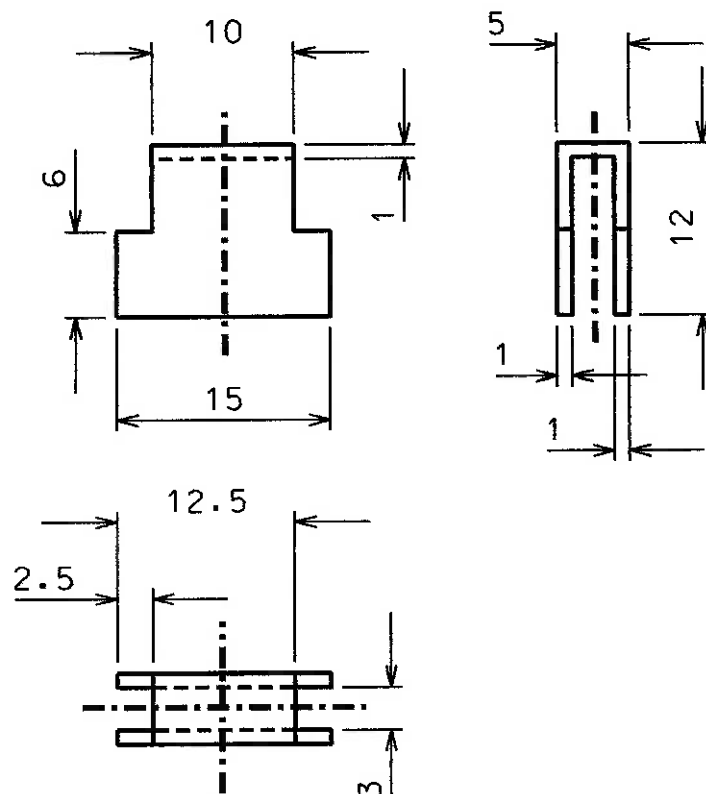


Material: aluminio
Tolerancia geral: 0,1mm

Escola	Escola Politecnica da Universidade de Sao Paulo		
Disciplina	Projeto de conclusao de curso		
Projeto	Robo para inspecao		Peca: Espacador do eixo do braco
Autor	Jose Roberto M. Jr.		
15/11/2004	Escala 2:1	Versao 01	

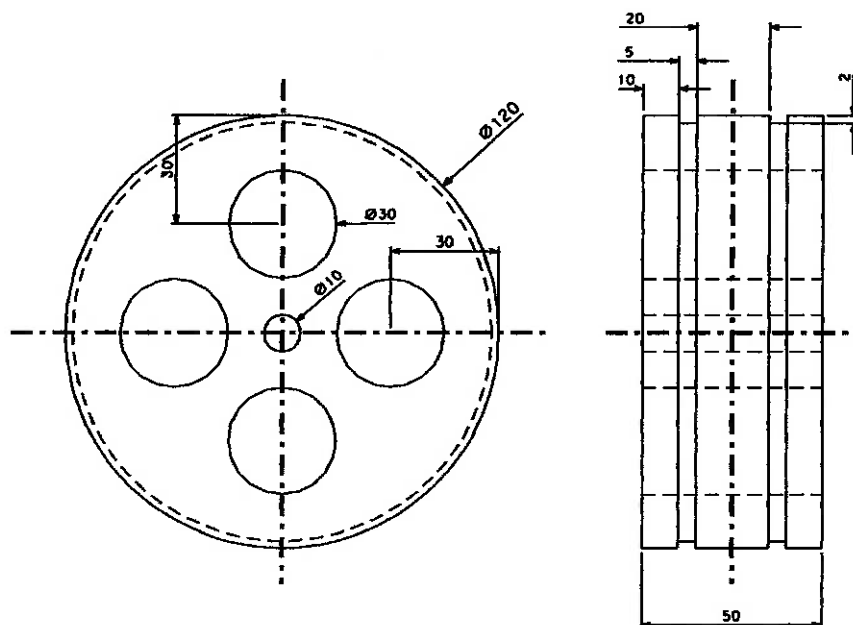


Escola	Universidade de Sao Paulo - Escola Politecnica		
Disciplina	Projeto de Conclusao de Curso		
Projeto	Robo de Busca		Peca Polia braco peq
Autor	Ricardo Vaz dos Santos Junior		
20/06/2004	Escala 1:1	Versao 1	

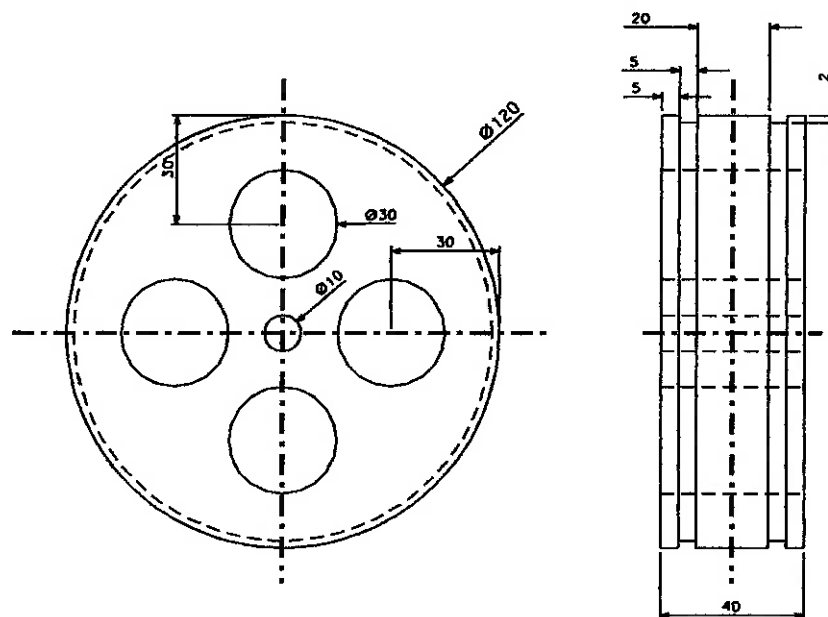


Material: aço
Tolerância geral: 0,1mm

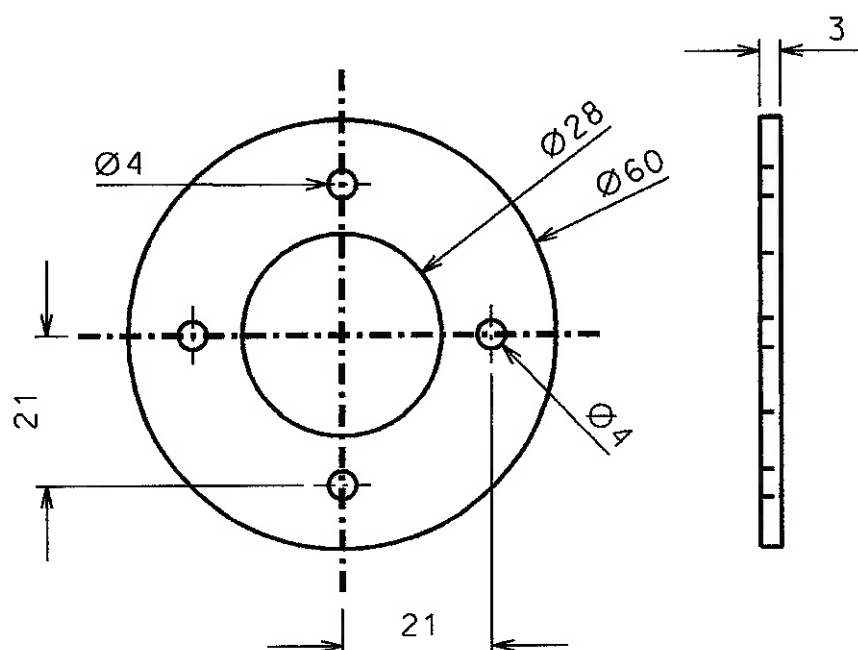
Escola	Escola Politecnica da Universidade de Sao Paulo		
Disciplina	Projeto de conclusao de curso		
Projeto	Robo para inspecao		Peca: Encosto do parafuso
Autor	Jose Roberto M. Jr.		
08/12/2004	Escala 2:1	Versao 01	



Escola	Universidade de Sao Paulo - Escola Politecnica		
Disciplina	Projeto de Conclusao de Curso		
Projeto	Robo de Busca		Peca Polia dianteira
Autor	Ricardo Vaz dos Santos Junior		
04/11/2004	Escala 1:2	Versao 1	

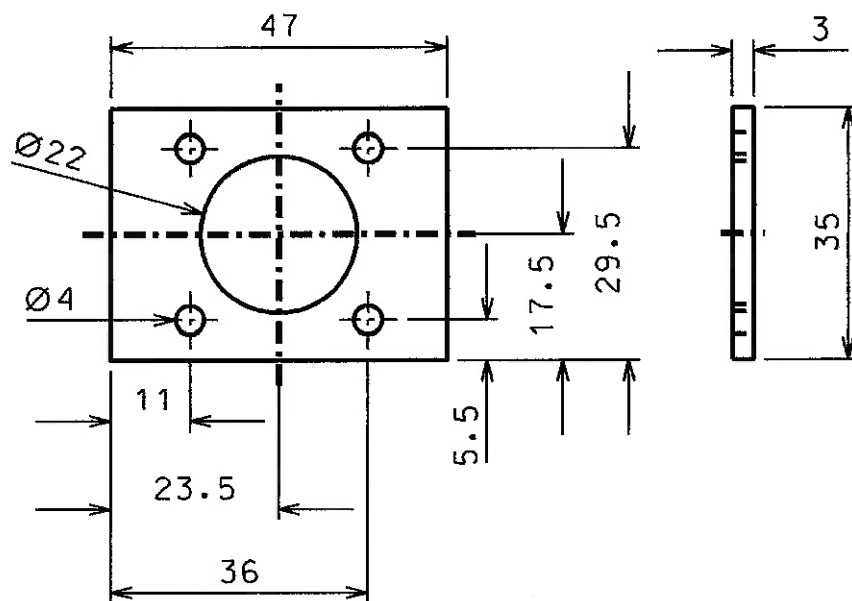


Escola	Universidade de Sao Paulo - Escola Politecnica		
Disciplina	Projeto de Conclusao de Curso		
Projeto	Robo de Busca		Peca Polia braco gde
Autor	Ricardo Vaz dos Santos Junior		
20/06/2004	Escala 1:2	Versao 1	



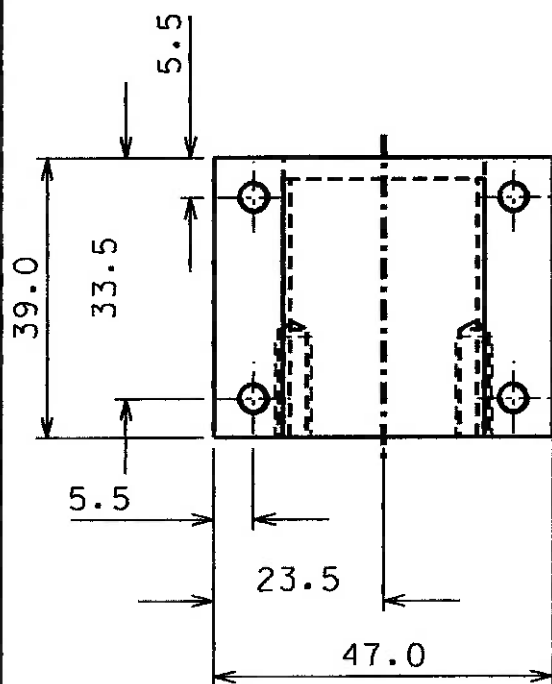
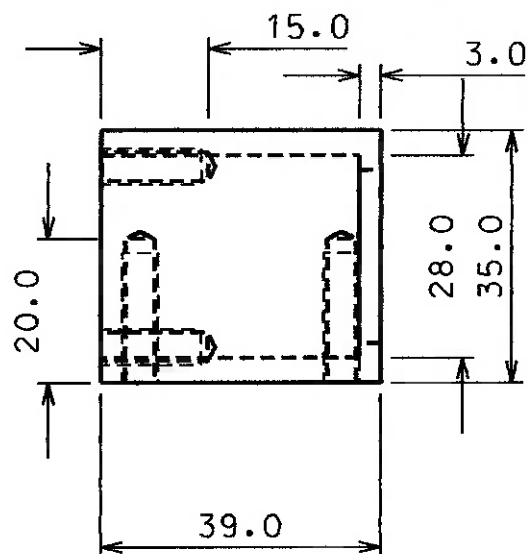
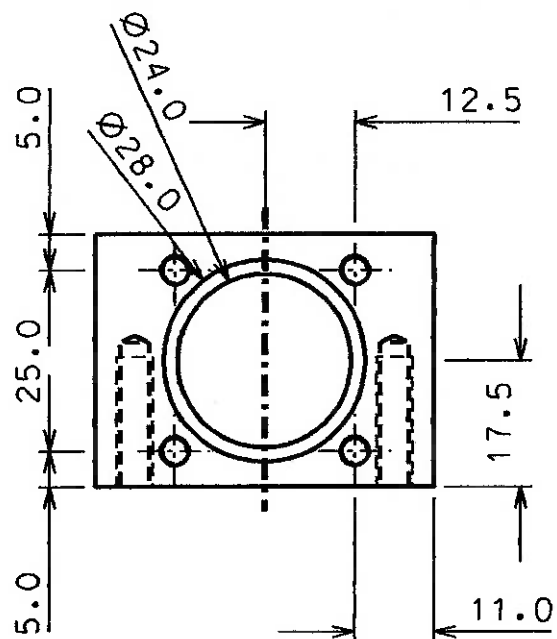
Material: Alumínio
Tolerancia geral: 0,1mm

Escola	Escola Politecnica da Universidade de Sao Paulo		
Disciplina	Projeto de conclusao de curso		
Projeto	Robo para inspecao		Peca: Espacador da polia sincron.
Autor	Jose Roberto M. Jr.		
25/11/2004	Escala 1:1	Versao 01	



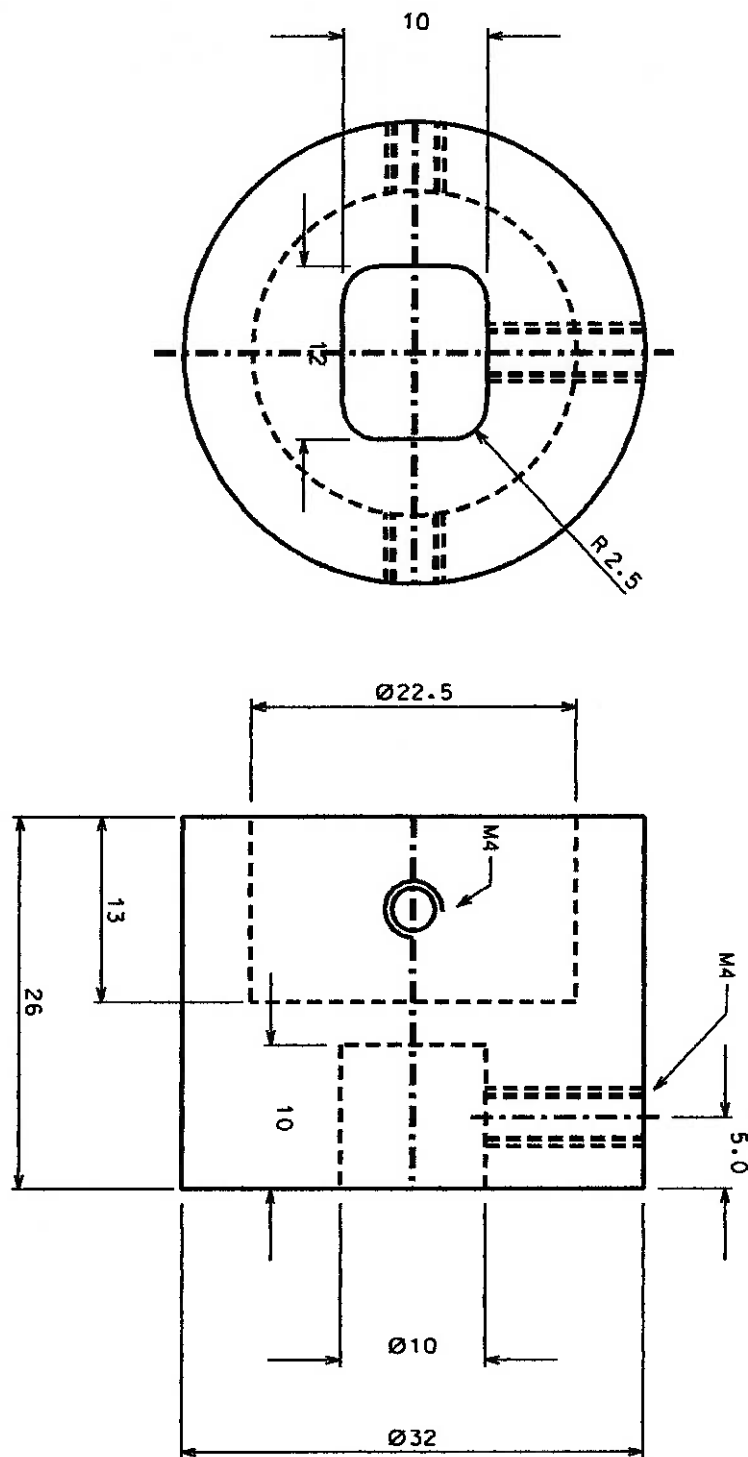
Material: aluminio
Tolerancia geral: 0,1mm

Escola	Escola Politecnica da Universidade de Sao Paulo		
Disciplina	Projeto de conclusao de curso		
Projeto	Robo para inspecao		Peca: Tampa do suporte rolamento
Autor	Jose Roberto M. Jr.		
15/11/2004	Escala 1:1	Versao 01	



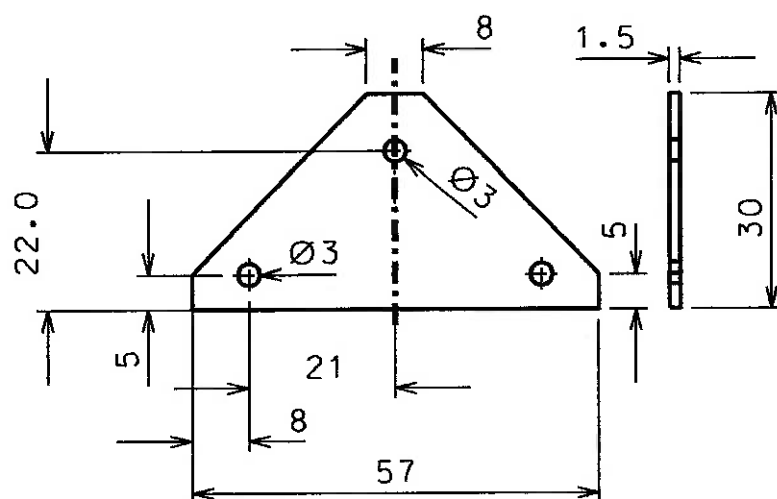
Todos os furos roscados possuem 4mm de diâmetro (M4)

Escola	Universidade de Sao Paulo - Escola Politecnica		
Disciplina	Projeto de Conclusao de Curso		
Projeto	Robo de Busca		Peca Suporte rolamento
Autor	Jose Roberto Moreno / Ricardo Vaz		
04/11/2004	Escala 1:1	Versao 1	



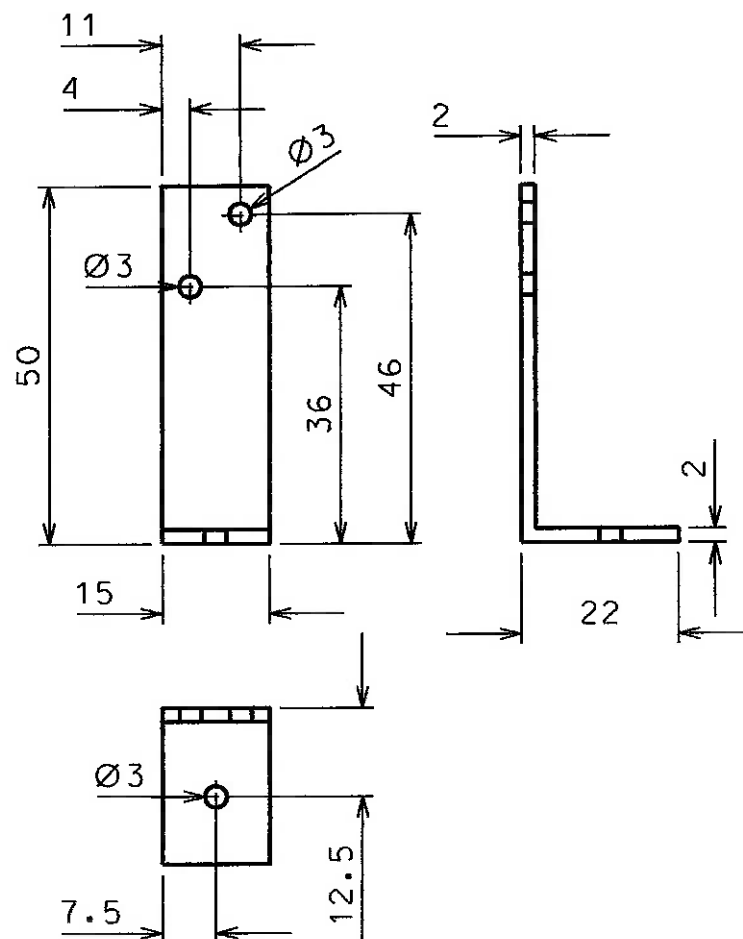
Material: Alumínio
Tolerancia geral: 0.1mm

Escola	Universidade de Sao Paulo - Escola Politecnica		
Disciplina	Projeto de Conclusao de Curso		
Projeto	Robo de Busca		Peca Acoplamento
Autor	Ricardo Vaz dos Santos Junior		
04/11/2004	Escala 2:1	Versao 2	



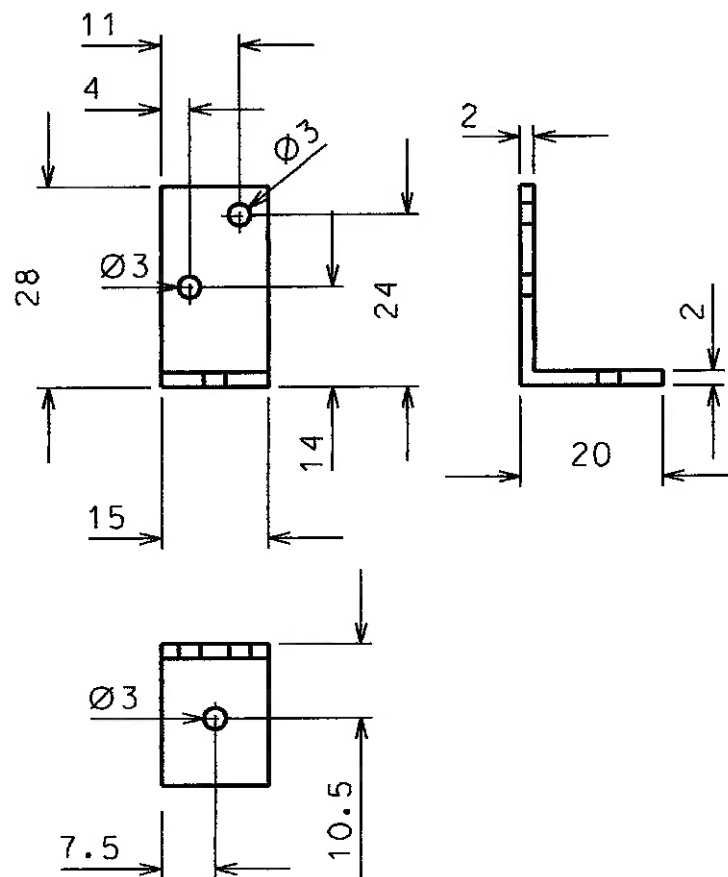
Material: Alumínio
Tolerancia geral: 0,1mm

Escola	Escola Politecnica da Universidade de Sao Paulo		
Disciplina	Projeto de conclusao de curso		
Projeto	Robo para inspecao		Peca: Triangulo do Esticador
Autor	Jose Roberto M. Jr.		
18/11/2004	Escala 1:1	Versao 01	



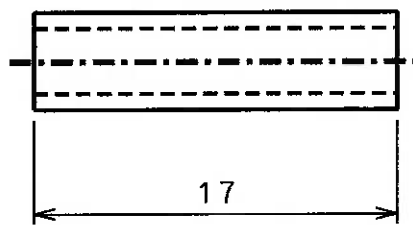
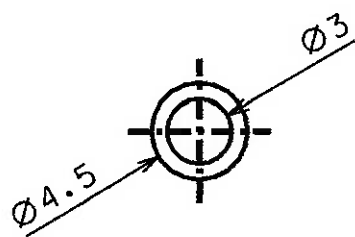
Material: Alumínio
Tolerância geral: 0,1mm

Escola	Escola Politecnica da Universidade de Sao Paulo		
Disciplina	Projeto de conclusao de curso		
Projeto	Robo para inspecao		Peca: Suporte do Esticador
Autor	Jose Roberto M. Jr.		
22/11/2004	Escala 1:1	Versao 01	



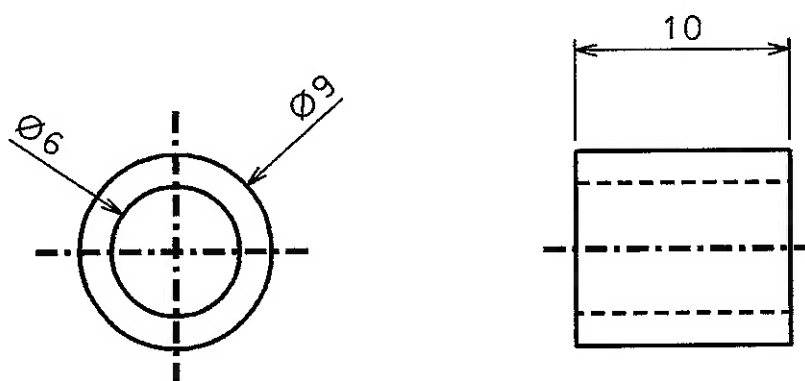
Material: Alumínio
Tolerância geral: 0,1mm

Escola	Escola Politecnica da Universidade de Sao Paulo		
Disciplina	Projeto de conclusao de curso		
Projeto	Robo para inspecao		Peca: Suporte do Esticador
Autor	Jose Roberto M. Jr.		
22/11/2004	Escala 1:1	Versao 01	



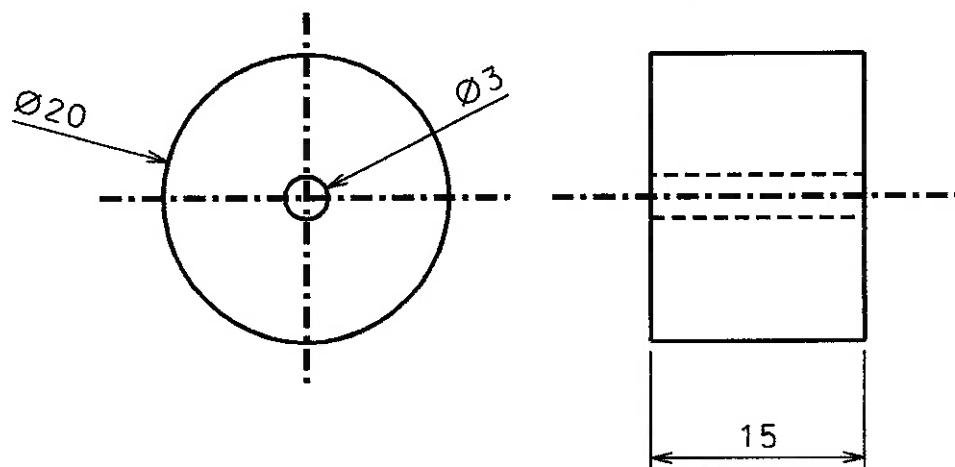
Material: Latão
Tolerância geral: 0,1mm

Escola	Escola Politecnica da Universidade de Sao Paulo		
Disciplina	Projeto de conclusao de curso		
Projeto	Robo para inspecao		Peca: Espacador do Esticador
Autor	Jose Roberto M. Jr.		
25/11/2004	Escala 3:1	Versao 01	



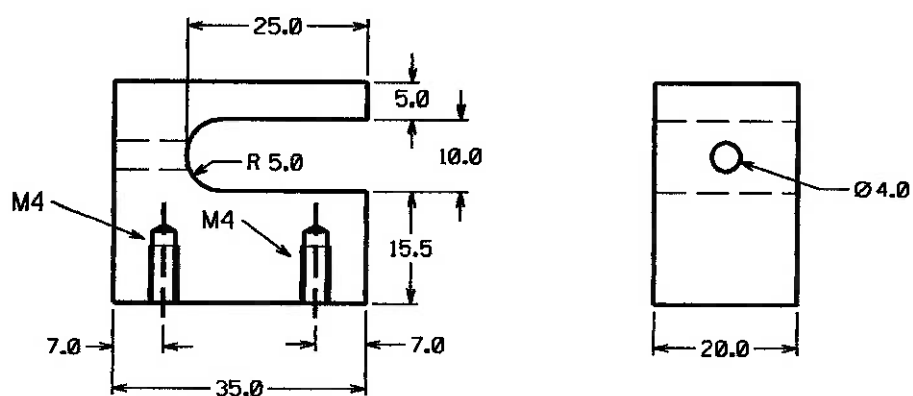
Material: Alumínio
Tolerância geral: 0.1mm

Escola	Escola Politecnica da Universidade de Sao Paulo		
Disciplina	Projeto de conclusao de curso		
Projeto	Robo para inspecao		Peca: Espacador do suporte do motor
Autor	Jose Roberto M. Jr.		
25/11/2004	Escala 3:1	Versao 01	



Material: Polipropileno
Tolerancia geral: 0,1mm

Escola	Escola Politecnica da Universidade de Sao Paulo		
Disciplina	Projeto de conclusao de curso		
Projeto	Robo para inspecao		Peca: Roda do Esticador
Autor	Jose Roberto M. Jr.		
22/11/2004	Escala 2:1	Versao 01	

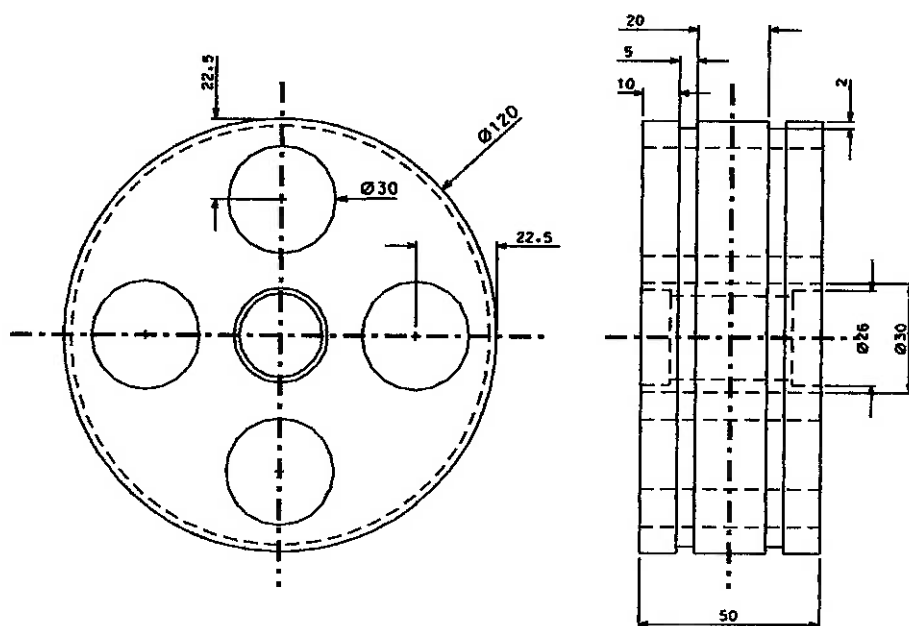


Furos roscados M4

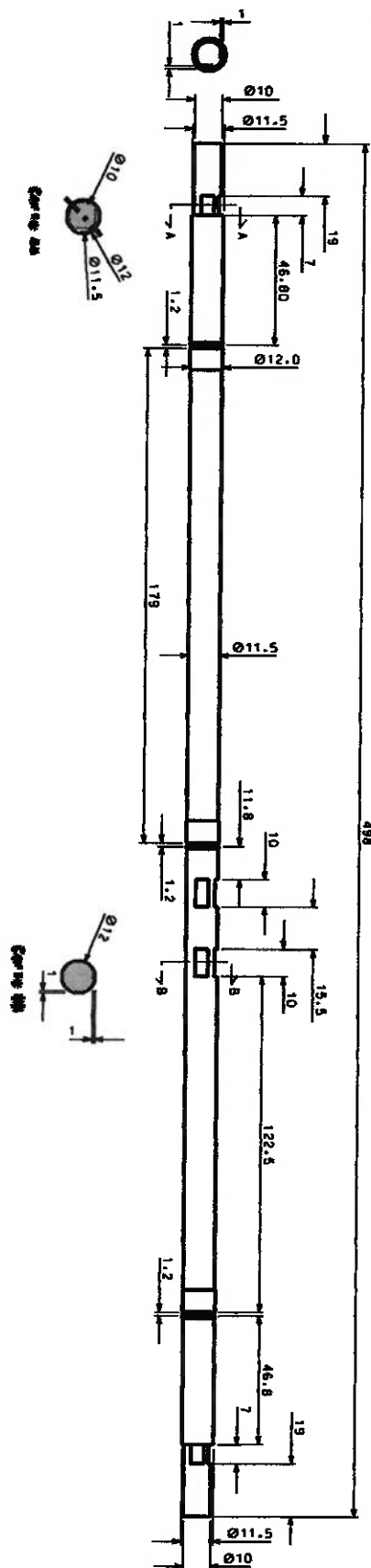
Escola	Universidade de Sao Paulo - Escola Politecnica		
Disciplina	Projeto de Conclusao de Curso		
Projeto	Robo de Busca		Peca Esticador Traseiro
Autor	Claudio Massumi Oda Nishimura		
12/12/2004	Escala 1:1	Versao 3	



Escola	Universidade de Sao Paulo - Escola Politecnica		
Disciplina	Projeto de Conclusao de Curso		
Projeto	Robo de Busca		Peca Eixo traseiro
Autor	Ricardo vaz dos Santos Junior		
04/11/2004	Escala 1:2	Versao 1	

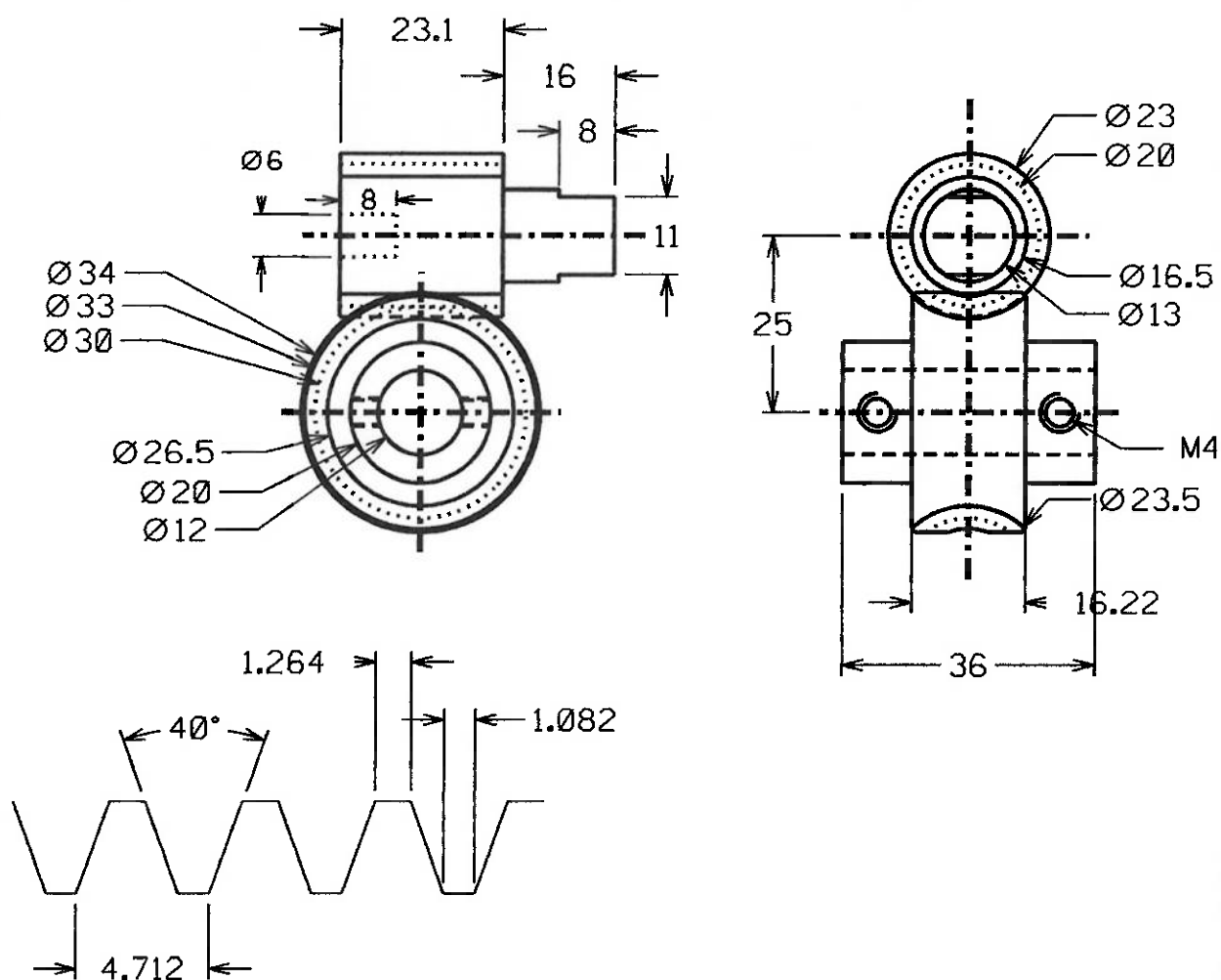


Escola	Universidade de Sao Paulo - Escola Politecnica		
Disciplina	Projeto de Conclusao de Curso		
Projeto	Robo de Busca		Peca Polia Traseira
Autor	Ricardo Vaz dos Santos Junior		
04/11/2004	Escala 1:2	Versao 1	



Material: Aço ABNT 1020
Tolerância geral: 0.1mm

Escola	Universidade de Sao Paulo - Escola Politecnica		
Disciplina	Projeto de Conclusao de Curso		
Projeto	Robo de Busca		Peca Acoplamento
Autor	Ricardo Vaz dos Santos Junior		
04/11/2004	Escala 1:2	Versao 2	



OS QUATRO FUROS SAO ROSCADOS M4

MODULO: 1,5

NUMERO DE DENTES NA COROA: 20

NUMERO DE FILETES NO SEM FIM: 2

ANGULO DE PRESSAO: 20 GRAUS

DIAMETRO PRIMITIVO SEM-FIM: 20 MM

DIAMETRO PRIMITIVO COROA: 30 MM

LARGURA DA CABECA DO DENTE: 1,264 MM

LARGURA DO FUNDO DO DENTE: 1,082 MM

PASSO: 4,712 MM

DISTANCIA ENTRE CENTROS: 25 MM

ANGULO DE PRESSAO = 20°

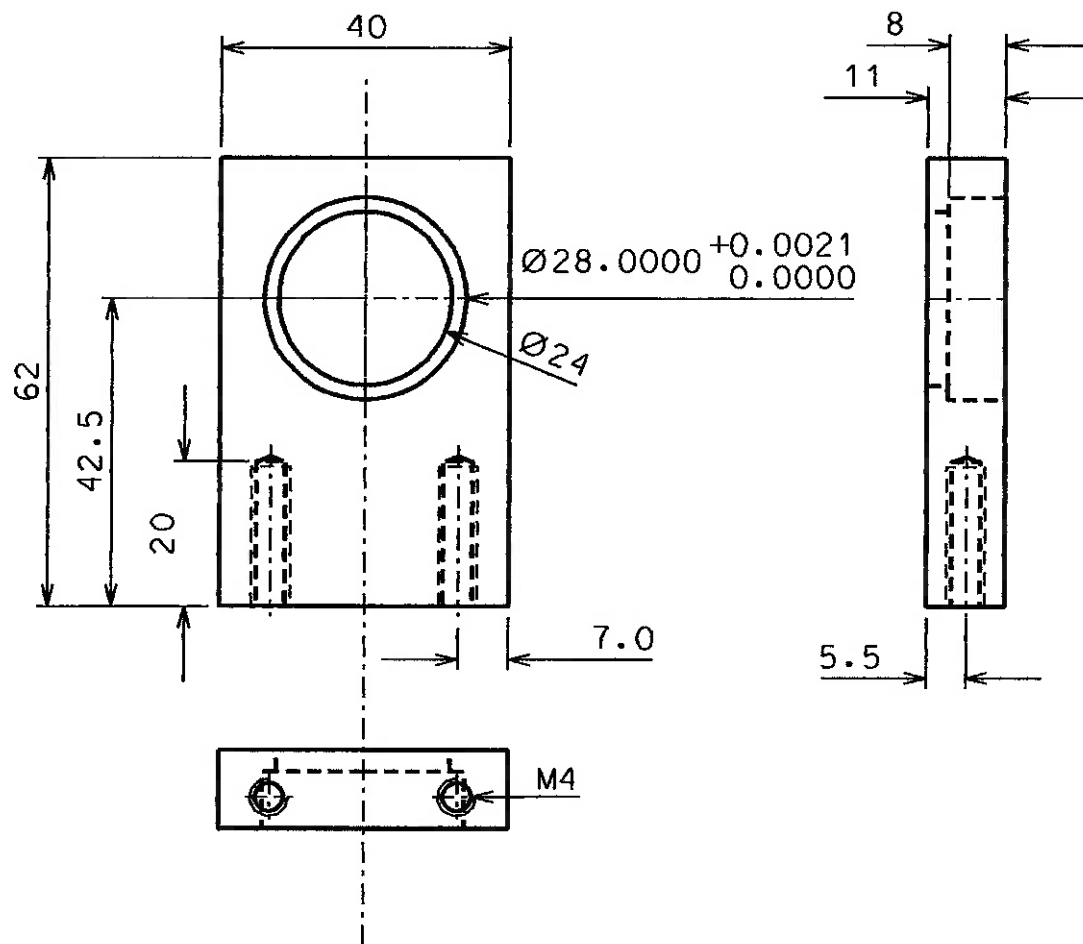
ANGULO DE HELICE (BETA) = 8° 31'

MATERIAL:

PARAFUSO: Nylon

COROA: Poliacetal

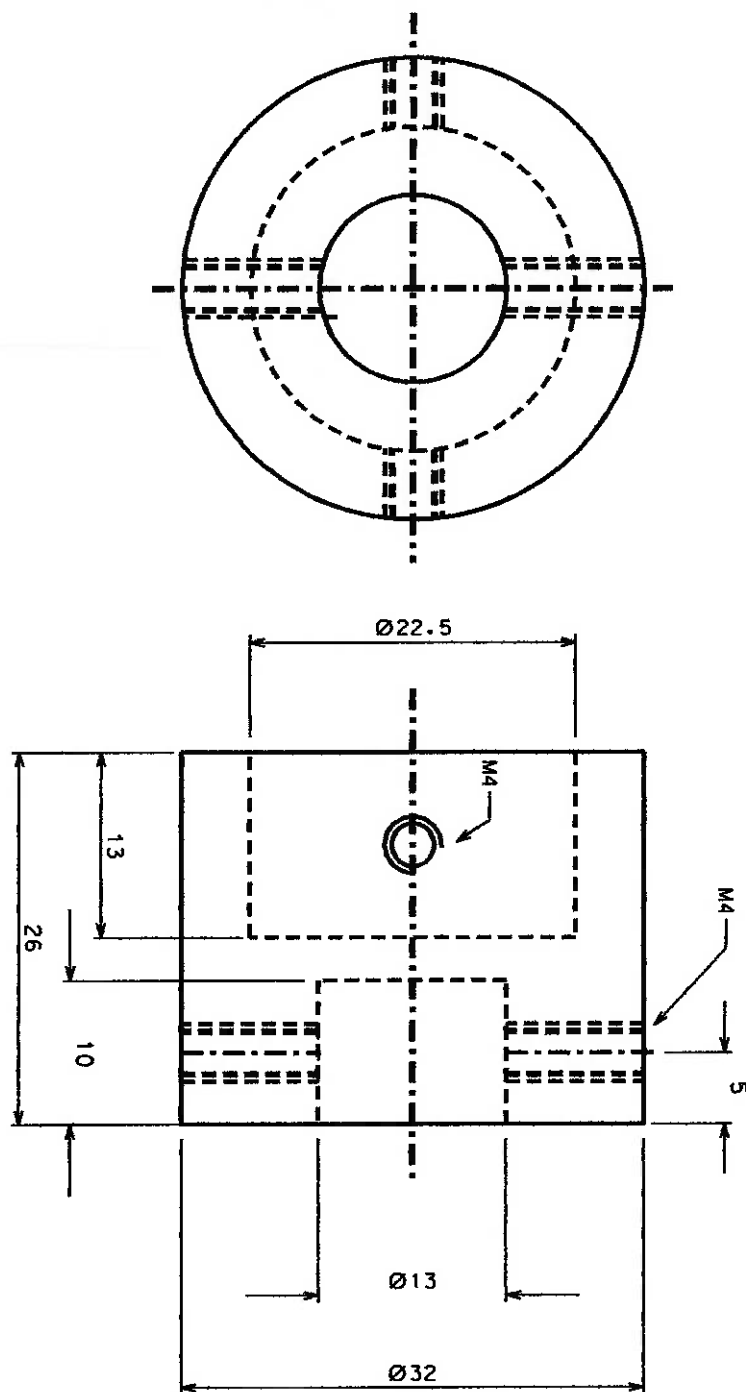
Escola	Universidade de Sao Paulo - Escola Politecnica		
Disciplina	Projeto de Conclusao de curso		
Projeto	Robo de Busca		Peca Par sem fim
Autor	Ricardo Vaz / Jose Roberto Moreno		
15/09/2004	Escala: 1:1	Versao: 2	



Ajuste no furo: H7
Raio de alojamento do rolamento: 0.5mm

Material: Alumínio
Tolerância geral: 0.1mm

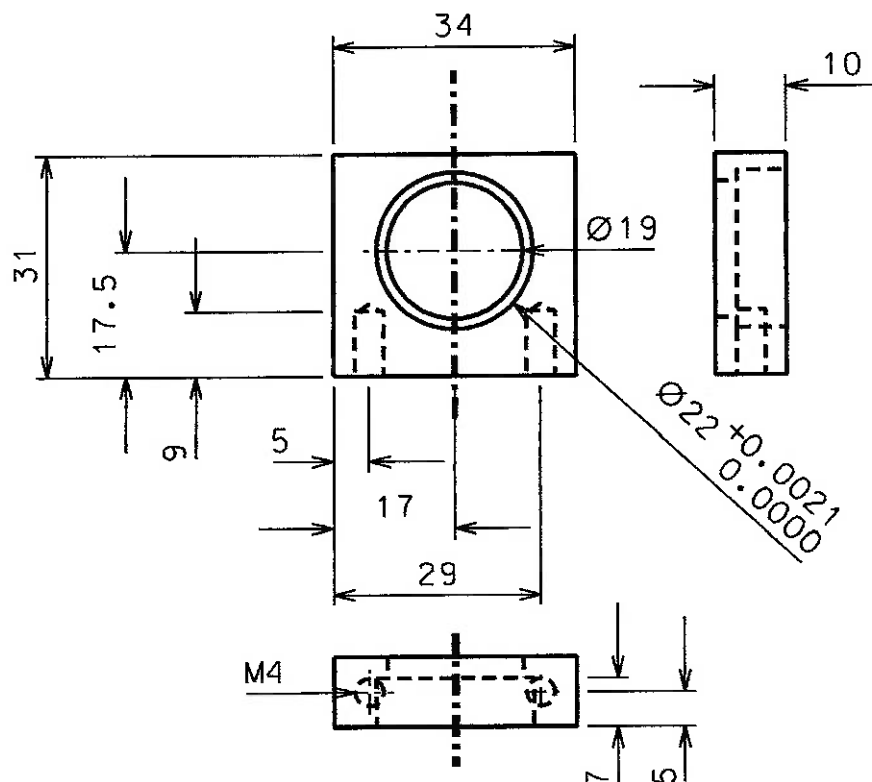
Escola	Escola Politecnica da Universidade de Sao Paulo		
Disciplina	Projeto de conclusao de curso		
Projeto	Robo para inspecao		Peca: Suporte do Rolamento
Autor	Jose Roberto M. Jr.		
10/11/2004	Escala 1:1	Versao 01	



Nota: Chanfrar cantos

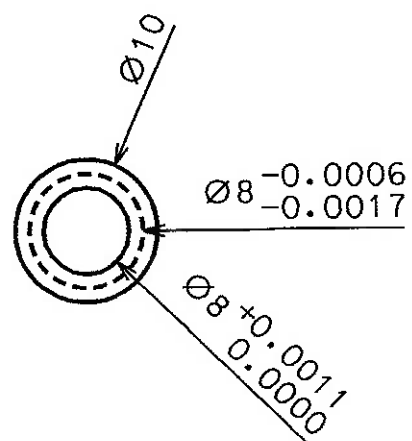
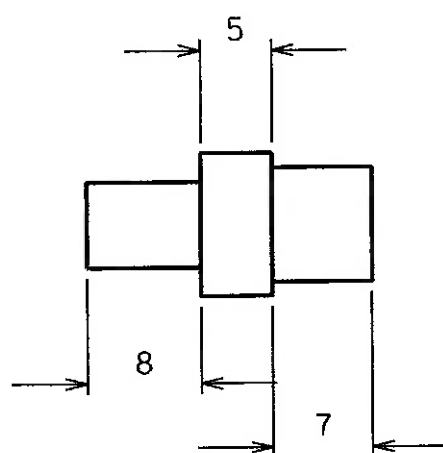
Material: Alumínio
Tolerancia geral: 0.1mm

Escola	Universidade de Sao Paulo - Escola Politecnica		
Disciplina	Projeto de Conclusao de Curso		
Projeto	Robo de Busca		Peca Acoplamento
Autor	Ricardo Vaz dos Santos Junior		
04/11/2004	Escala 2:1	Versao 2	



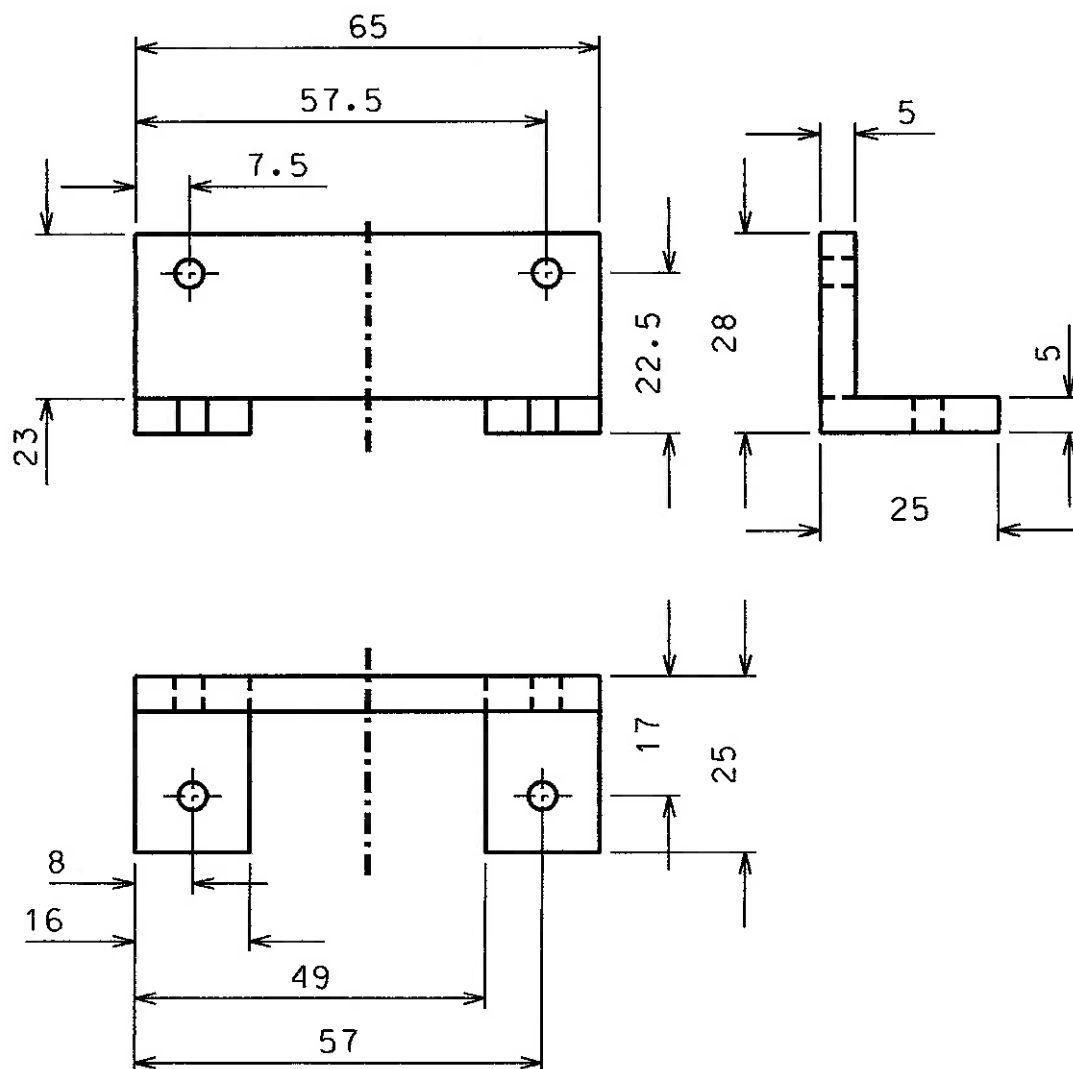
Material: Alumínio
Tolerância geral: 0.1mm

Escola	Escola Politecnica da Universidade de Sao Paulo		
Disciplina	Projeto de conclusao de curso		
Projeto	Robo para inspecao		Peca: Suporte do rolam. (sem fim)
Autor	Jose Roberto M. Jr.		
10/11/2004	Escala 1:1	Versao 01	



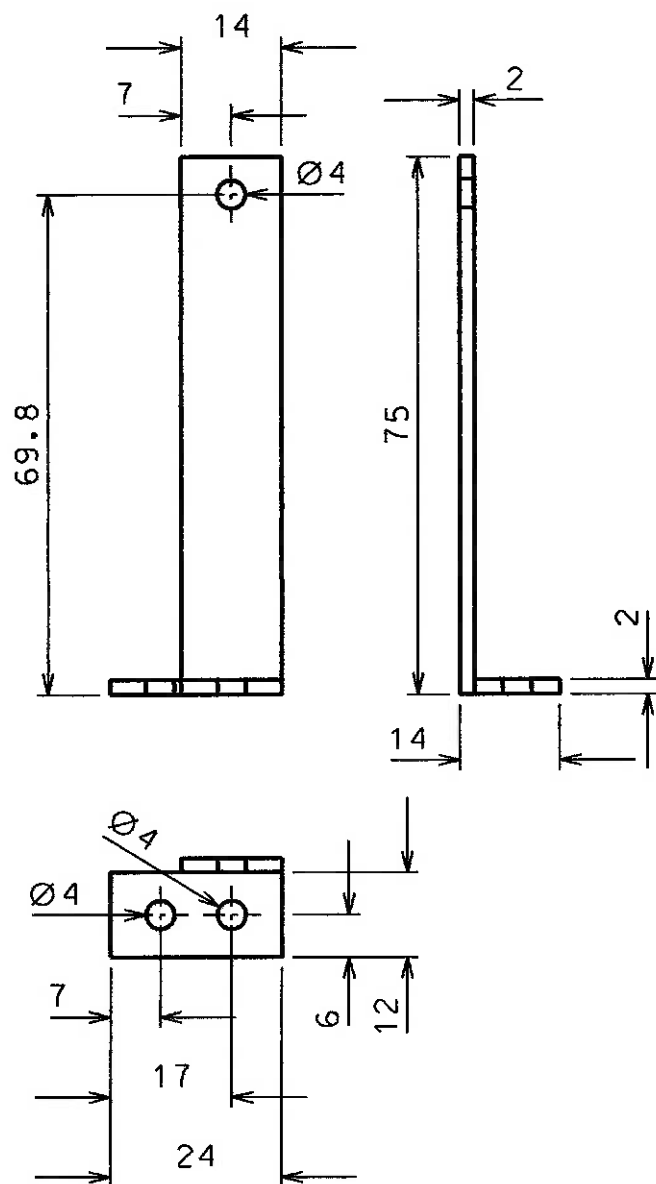
Material: Alumínio
Tolerancia geral: 0,1mm

Escola	Escola Politecnica da Universidade de Sao Paulo		
Disciplina	Projeto de conclusao de curso		
Projeto	Robo para inspecao		Peca: Eixo p/ o parafuso sem fim
Autor	Jose Roberto M. Jr.		
03/12/2004	Escala 1:2	Versao 01	



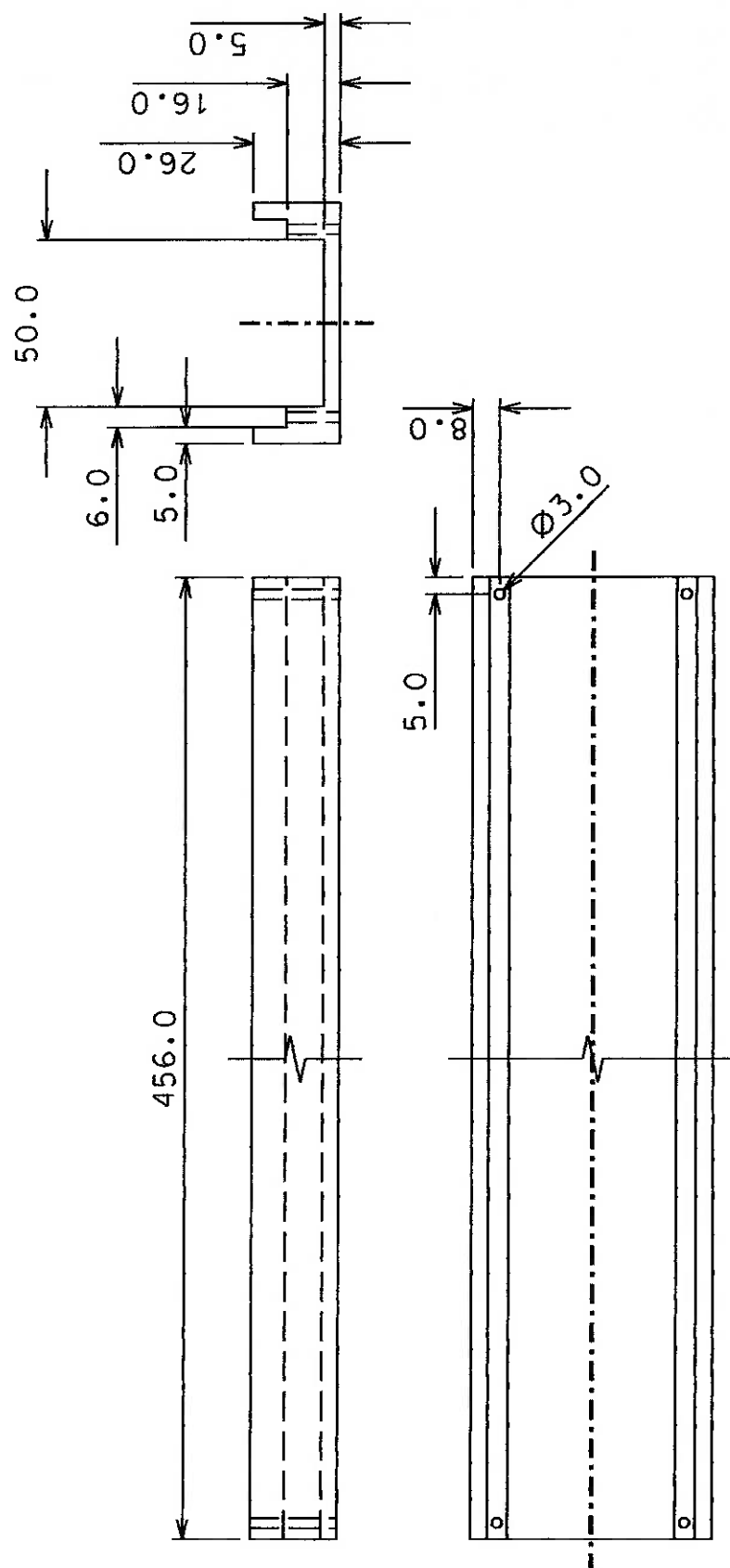
Material: Alumínio
Tolerância geral: 0.1mm

Escola	Escola Politecnica da Universidade de Sao Paulo		
Disciplina	Projeto de conclusao de curso		
Projeto	Robo para inspecao		Peca: Suporte inferior do motor
Autor	Jose Roberto M. Jr.		
25/11/2004	Escala 1:1	Versao 01	

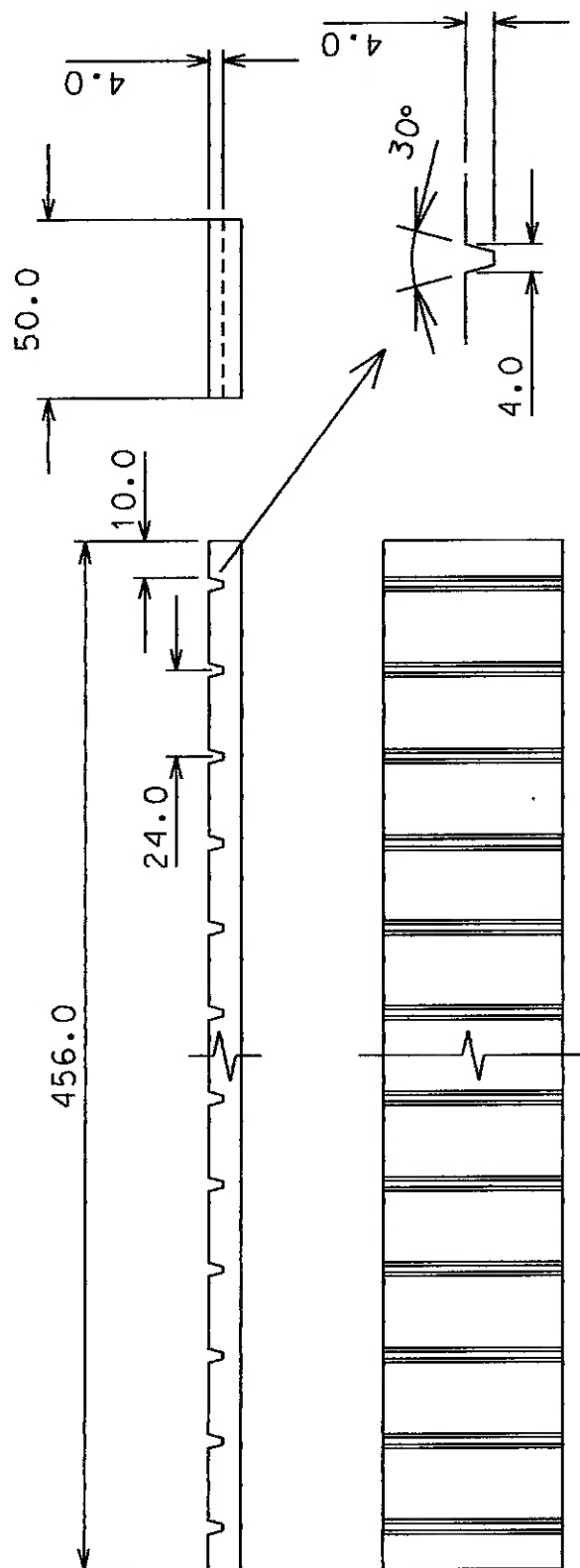


Material: Alumínio
Tolerancia geral: 0,1mm

Escola	Escola Politecnica da Universidade de Sao Paulo		
Disciplina	Projeto de conclusao de curso		
Projeto	Robo para inspecao		Peca: Suporte superior do motor
Autor	Jose Roberto M. Jr.		
25/11/2004	Escala 1:1	Versao 01	



Escola	Universidade de Sao Paulo - Escola Politecnica		
Disciplina	Projeto de Conclusao de Curso		
Projeto	Robo de Busca		Peca Molde Base
Autor	Claudio Massumi Oda Nishimura		
20/06/2004	Escala 2:1	Versao 1	



Escola	Universidade de Sao Paulo - Escola Politecnica		
Disciplina	Projeto de Conclusao de Curso		
Projeto	Robo de Busca		Peca Molde Miolo
Autor	Claudio Massumi Oda Nishimura		
20/06/2004	Escala 2:1	Versao 1	