

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA INDUSTRIAL MECÂNICA

ALEXANDRE BIANCHI ROSA
RONALDO GNOATTO

**REPROJETO E CONSTRUÇÃO DE PROTÓTIPO DE UM ROBÔ
DE INSPEÇÃO DE CORDÕES DE SOLDA EM SUPERFÍCIES
METÁLICAS VERTICAIS E ESFÉRICAS (SEGUNDA GERAÇÃO)**

CURITIBA

2015

REPROJETO E CONSTRUÇÃO DE PROTÓTIPO DE UM ROBÔ DE INSPEÇÃO DE CORDÕES DE SOLDA EM SUPERFÍCIES METÁLICAS VERTICAIS E ESFÉRICAS (SEGUNDA GERAÇÃO)

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 do curso de Engenharia Industrial Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para aprovação na disciplina.

Orientador: Prof. Carlos Cziulik, Ph. D.

UTFPR - Damec

CURITIBA

2015

TERMO DE ENCAMINHAMENTO

Venho, por meio deste termo, encaminhar para apresentação a monografia do Projeto de Pesquisa “REPROJETO E CONSTRUÇÃO DE PROTÓTIPO DE UM ROBÔ DE INSPEÇÃO DE CORDÕES DE SOLDA EM SUPERFÍCIES METÁLICAS VERTICAIS E ESFÉRICAS (SEGUNDA GERAÇÃO)”, realizada pelos alunos Alexandre Bianchi Rosa e Ronaldo Antônio Gnoatto, como requisito parcial para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 do curso de Engenharia Industrial Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Carlos Cziulik, Ph. D.

UTFPR – Damec

Curitiba, 04 de fevereiro de 2015.

TERMO DE APROVAÇÃO

Por meio deste termo, aprovamos a monografia do Projeto de Pesquisa “REPROJETO E CONSTRUÇÃO DE PROTÓTIPO DE UM ROBÔ DE INSPEÇÃO DE CORDÕES DE SOLDA EM SUPERFÍCIES METÁLICAS VERTICAIS E ESFÉRICAS (SEGUNDA GERAÇÃO)”, realizada pelos alunos Alexandre Bianchi Rosa e Ronaldo Antônio Gnoatto, como requisito parcial para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Industrial Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof. Carlos Cziulik, Ph. D.

DAMEC, UTFPR

Orientador

Prof. Josmael Roberto Kampa, Me.

DAMEC, UTFPR

Avaliador

Prof. Daniel Rodrigues Pipa, D. Sc.

DAELN, UTFPR

Avaliador

Curitiba, 04 de fevereiro de 2015

RESUMO

GNOATTO, Ronaldo Antonio; ROSA, Alexandre Bianchi. **Reprojeto e Construção do Protótipo de um Robô de Inspeção de Cordões de Solda em Superfícies Metálicas Verticais e Esféricas (Segunda Geração)**. 2015. 138 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

Os ensaios não destrutivos são métodos de análise e realização de manutenção preventiva de peças e máquinas em campo. O método de ultrassom é um método eficiente para inspecionar descontinuidades em metais. Porém, muitos métodos de inspeção por ultrassom ainda são manuais, demorados e oferecem risco ao inspetor. O CENPES da Petrobras desenvolveu um robô para a inspeção dos cordões de solda nos tanques de armazenamento de petróleo. O equipamento não se mantém fixado às paredes dos tanques nas posições vertical e sobre cabeça, devido ao seu peso elevado e baixa capacidade de adesão das rodas magnéticas. Buch e Souza (2010) e Rovani (2013), com o desenvolvimento de um novo robô de inspeção, reduziram a massa total e aumentaram a capacidade de adesão na superfície dos tanques. Algumas limitações impediram que o robô fosse levado a campo. A elevada força magnética das rodas impediu o robô de realizar manobras. Levantou-se, então, a necessidade de desenvolver um novo robô que empregasse as funções de direção, cambagem e suspensão, necessárias para a sua locomoção. Utilizando-se da metodologia de desenvolvimento de produto por encomenda (*Engineering To Order*), definida por Rozenfeld et. Al. (2006), desenvolveu-se uma nova topologia para o robô de inspeção. A segunda geração do robô possui rodas direcionais e um sistema de suspensão e cambagem que permitem o robô de transitar sem risco de desconexão e sem escorregamento das rodas. O respeito a condição de Ackerman e a cambagem com eixo de giro próximo da superfície de rolagem fornecem maior confiabilidade na realização da trajetória e mais versatilidade à sua aplicação. As rodas do robô construído por Rovani (2013) foram

mantidas e a massa total foi reduzida, ainda, em 20%. Seu peso atual é igual a 12,5 kgf, considerando os componentes eletrônicos instalados.

Palavras-chave: robô de inspeção, superfícies metálicas verticais, reprojeto, metodologia de projeto, rodas direcionais, cambagem, suspensão, chassi bipartido e articulado.

ABSTRACT

Non-destructive testing is a group of analysis techniques used to perform preventive field maintenance of parts and machines. Ultrasonic testing is an efficient method for inspecting flaws in metals. Many ultrasonic inspection methods are however yet manual, time consuming and risky to the inspector. CENPES department of Petrobras developed a robot for weld beads inspection on the oil storage tanks. The equipment does not stay attached to the tank walls in vertical and over-head positions, due to its high weight and low adhesion capacity of magnetic wheels. Buch and Souza (2010) and Rovani (2013), through the development of a new inspection robot, reduced total mass and increased adhesiveness on tanks surfaces. Limitations prevented the robot from being used in the field. The high magnetic force of the wheels prevented the robot from perform maneuvers. The development of a new robot was needed, one that performs the direction, camber and suspension functions required for locomotion. Using the product development methodology “Engineering To Order”, defined by Rozenfeld et. Al. (2006), a new topology for the inspection robot was developed. The second-generation robot has directional wheels, suspension and camber system which allow the robot to move without disconnection risk and without wheel slippage. The consideration of Ackerman condition and the camber with spin axis near the running surface provided greater reliability in carrying out the trajectory and more versatility to its application. The wheels of the robot constructed by Rovani (2013) were maintained and the total weight was also reduced in 20%. The second-generation robot current weight is 12.5 kgf, including electronics installed.

Keywords: *inspection robot, vertical metal surfaces, redesign, project methodology, directional wheels, camber, suspension, bipartite and articulated chassis.*

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Tipos de tanques	19
Figura 2 – Veículo com rodas direcionais dianteiras e a condição de Ackerman.	24
Figura 3 – Tipos de rodas	25
Figura 4 – Robô omnidirecional com rodas direcionais centralizadas	26
Figura 5 – Uniciclo	26
Figura 6 – Triciclo	27
Figura 7 – Quadriciclo. Sistema de condição de Ackerman.	27
Figura 8 – Eixo diferencia traseiro	28
Figura 9 – Tração através de correias	29
Figura 10 – Robô da NASA <i>Curiosity rover</i> utilizado na missão <i>Mars Science Laboratory</i> em 2012	29
Figura 11 – Representação geométrica do sistema tandem.	32
Figura 12 – Sistema de direção e tração da primeira geração do robô.	34
Figura 13 – Escorregamento das rodas traseiras durante a realização de curvas.	35
Figura 14 – Trajetória real das rodas do robô e trajetória programada.	36
Figura 15 – Vista explodida da roda desenvolvida por Rovani (2013).	37
Figura 16 – Sistema de suspensão tandem	38
Figura 17 – Mola de torção do sistema tandem do robô de primeira geração	39
Figura 18 – Mecanismo de cambagem da primeira geração do robô.	40
Figura 19 – Barra de ligação rosqueada.	40
Figura 20 – Ponto de cambagem alto.	41
Figura 21 – Chassi do robô primeira geração.	42

Figura 22 – Teste de força de atrito em deslizamento longitudinal.	43
Figura 23 – DCL das forças durante deslizamento longitudinal	44
Figura 24 – Teste de força de atrito em deslizamento lateral	46
Figura 25 – Teste de momento de tombamento da roda	48
Figura 26 – DCL das forças durante deslizamento longitudinal	49
Figura 27 – Teste de desgaste da cobertura da roda em deslocamento retilíneo	50
Figura 28 – Maiores dimensões de tanques de petróleo e derivados	51
Figura 29 – Teste de desgaste da cobertura da roda em deslocamento curvilíneo	53
Figura 30 – Tanque com maior altura	54
Figura 31 – Teste de desgaste da cobertura da roda em rotação no próprio eixo	55
Figura 32 – Formato da topologia para validação das rodas.	63
Figura 33 – DCL do momento de tombamento	65
Figura 34 – Cambagem da roda em reação ao seu ponto de giro	66
Figura 35 – Formatos de losango articulado	67
Figura 36 – Ilustração do sistema de direcionamento acionado por servo motor	69
Figura 37 – Ilustração do sistema de tração	69
Figura 38 – Chassi e o sistema de suspensão	70
Figura 39 – Ilustração da cambagem do robô da segunda geração	70
Figura 40 – Topologia final da segunda geração do robô	71
Figura 41 – Relação dos subconjuntos e subsistemas	72
Figura 42 – Ilustração do formato do chassi	74
Figura 43 – Perfil estrutural de alumínio, 20x20mm	75
Figura 44 – Chassi: Perfis Kanya	76
Figura 45 – Suportes usinados do chassi	76
Figura 46 – Suportes montados nos perfis	77

Figura 47 – Vista inferior do chassi articulado com dobradiças	78
Figura 48 – Roda desenvolvida por Rovani (2013).	79
Figura 49 – Distâncias funcionais do mancal de cambagem	80
Figura 50 – Mancal da roda	80
Figura 51 – Ângulo máximo de cambagem	81
Figura 52 – Conjunto de locomoção	82
Figura 53 – Conjunto do sensor de distância	83
Figura 54 – Conjunto do sensor laser	83
Figura 55 – Montagem final.	84
Figura 56 – Dimensões gerais do robô de segunda geração	85
Figura 57 – Exemplo de desenho de fabricação 2D	86
Figura 58 – Formatos dos losangos bipartidos articulados	87
Figura 59 – Regulagens do conjunto de locomoção	89
Figura 60 – Chassi da segunda geração e alternativa simplificada	93
Figura 61 – Distância entre centros das rodas	93
Figura 62 – Solução simplificada para desalinhamento das rodas	94
Figura 63 – Projeto do protótipo simplificado	94
Figura 64 – Projeto do protótipo simplificado	95
Figura 65 – Protótipo simplificado em cilindro de diâmetro 550 mm	95
Figura 66 – Marcação do contorno e furação das chapas do chassi	97
Figura 67 – Corte dos componentes em barra chata de alumínio	97
Figura 68 – Furação e acabamento dos componentes para montagem	97
Figura 69 – Teste com protótipo simplificado na calota esférica	100
Figura 70 – Acomodação do ângulo de cambagem e suspensão do protótipo	100
Figura 71 – Inclinação do perfil central do chassi no protótipo	101

Figura 72 – Cantoneira de fixação do triângulo com o perfil central do chassi.	101
Figura 73 – Teste de capacidade de carga (Racl)	102
Figura 74 – Teste de capacidade de carga (Ract)	104
Figura 75 – Teste de capacidade de carga (Rcargz)	105
Figura 76 – Motor de tração Maxon EC4Pole 22 ref.: 311536	112
Figura 77 – Dimensões do motor de tração Maxon EC4Pole 22	114
Figura 78 – Redutor Maxon Planetary Gearhead GP 22 HP	114
Figura 79 – Dimensões do redutor Maxon Planetary Gearhead GP 22 HP	115
Figura 80 – Encoder Maxon HEDL 5540 500 CPT, 3 Channels, with Line Driver RS 422	116
Figura 81 – Dimensões encoder Maxon HEDL 5540 500 CPT, 3 Channels, with Line Driver RS 422	116
Figura 82 – Servo motor Dynamixel MX64T	117
Figura 83 – Dimensões servo motor Dynamixel MX64T	118
Figura 84 – Servo motor Dynamixel AX18A	118
Figura 85 – Dimensões servo motor Dynamixel AX18A	119
Figura 86 – Placa mãe PCM-3363	120
Figura 87 – Driver motor EPOS2 24/5	121
Figura 88 – Sensor inercial AHRS-8 Attitude Heading Reference System	121
Figura 89 – Sensor de distância Dimetix EDS-C	122
Figura 90 – Sensor laser Hokuyo URG-04LX	123
Figura 91 – Câmera Mesa Imaging SR4000	123
Figura 92 – Simulação do robô C.1	127
Figura 93 - Simulação do robô C.2	128
Figura 94 – Simulação do robô C.3	129
Figura 95 – Simulação do robô C.4	129

Figura 96 – Simulação do robô C.5	130
Figura 97 – Simulação do robô C.6	131
Figura 98 – Simulação do robô C.7	131
Figura 99 – Simulação do robô C.8	132
Figura 100 – Simulação do robô C.9	133
Figura 101 – Simulação do robô C.10	133
Figura 102 – Simulação do robô C.11	134
Figura 103 – Simulação do robô C.12	134
Figura 104 – Condição de Ackerman.	136
Figura 105 – Veículo com rodas direcionais dianteiras	137

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Erro relativo da trajetória do robô durante a realização de curvas	35
Tabela 2 – Força de descolamento das rodas magnéticas	38
Tabela 3 – Força de atrito longitudinal em superfície suja e limpa	45
Tabela 4 – Força de atrito em deslizamento lateral.....	47
Tabela 5 – Momento de tombamento da roda.....	49
Tabela 6 – Resultados do teste de desgaste em deslocamento retilíneo	52
Tabela 7 – Resultados do teste de desgaste em deslocamento curvilíneo	54
Tabela 8 – Resultados do teste de desgaste com rotação no seu próprio eixo	56
Tabela 9 – Modelo de desenvolvimento de produto sob-encomenda (ETO)	59
Tabela 10 – Força de descolamento das rodas magnéticas, Rovani (2013).....	64
Tabela 11 – Componentes comerciais para protótipo simplificado	96
Tabela 12 – Custos do protótipo simplificado.....	96
Tabela 13 – Posições de teste do protótipo	99
Tabela 14 – Capacidade de carga do robô na condição Racl.....	103
Tabela 15 – Capacidade de carga do robô na condição Ract.....	104
Tabela 16 – Capacidade de carga do robô na condição Rcargz.....	106
Tabela 17 – Tabela de peças e referências	125

ACRÔNIMOS

CENPES	Centro de Pesquisas da Petrobras
CG	Centro de Gravidade
DCL	Diagrama de Corpo Livre
END	Ensaio Não Destrutivo
ETO	<i>Engineering To Order</i> (Projeto sob encomenda)
PDP	Projeto de Desenvolvimento de Produto
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	CONTEXTO	18
1.2	OPORTUNIDADE DE PESQUISA	19
1.3	OBJETIVOS	20
1.3.1	Objetivo Geral	20
1.3.2	Objetivos Específicos	20
1.4	JUSTIFICATIVA	20
1.5	METODOLOGIA ADOTADA	21
1.6	ESTRUTURA DO TRABALHO	21
2	SUBSISTEMAS MECÂNICOS DE ROBÔS	22
2.1	SISTEMA DE DIREÇÃO	23
2.1.1	Omnidirecional	25
2.1.2	Uniciclo	26
2.1.3	Triciclo	26
2.1.4	Quadriciclo	27
2.2	SISTEMA DE TRAÇÃO	27
2.2.1	Tração em eixos independentes	28
2.2.2	Tração em lados independentes	28
2.2.3	Tração em rodas independentes	29
2.3	SISTEMA DE CONEXÃO	30
2.4	SISTEMA DE SUSPENSÃO	30
2.4.1	Suspensão passiva	30
2.4.2	Suspensão ativa	31
2.4.3	Suspensão com barra de torção	31
2.4.4	Suspensão por tandem	31
2.5	SISTEMA DE CAMBAGEM	32
2.5.1	Cambagem ativa	32
2.5.2	Cambagem passiva	32
2.6	SISTEMA ESTRUTURAL (CHASSI)	33
2.7	CONSIDERAÇÕES SOBRE OS SUBSISTEMAS MECÂNICOS	33
3	ANÁLISE DA PRIMEIRA GERAÇÃO DO ROBÔ	34
3.1	SISTEMA DE DIREÇÃO	34
3.2	SISTEMA DE TRAÇÃO	37
3.3	SISTEMA DE CONEXÃO	37
3.4	SISTEMA DE SUSPENSÃO	38
3.5	SISTEMA DE CAMBAGEM	39
3.6	CHASSI	41
3.7	TESTES REALIZADOS	42
3.7.1	Força de atrito em deslizamento longitudinal (FadL)	43
3.7.2	Força de atrito em deslizamento lateral (FadLt)	46
3.7.3	Momento de tombamento da roda (Mtr)	47
3.7.4	Desgaste da cobertura da roda em deslocamento retilíneo (Dcdr)	49
3.7.5	Desgaste da cobertura da roda em deslocamento em curva (Dcdrdc)	52

3.7.6	Desgaste da cobertura da roda girando no próprio eixo (Dcrgpe)	55
3.8	CONSIDERAÇÕES SOBRE A PRIMEIRA GERAÇÃO DO ROBÔ	56
3.8.1	Limitações	57
4	DESENVOLVIMENTO DA SOLUÇÃO CONCEITUAL	58
4.1	ESCOPO DO PRODUTO	58
4.2	METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO	58
4.3	NECESSIDADES DOS CLIENTES	60
4.4	ESPECIFICAÇÕES DO PRODUTO	61
4.5	DESENVOLVIMENTO DO ROBÔ	61
4.5.1	Sistema de direção	62
4.5.2	Sistema de tração	62
4.5.3	Sistema de conexão	62
4.5.4	Sistema de suspensão	65
4.5.5	Sistema de cambagem	66
4.5.6	Chassis	66
4.6	LAYOUT FINAL	68
4.6.1	Sistema de direção	68
4.6.2	Sistema de tração	69
4.6.3	Sistema de conexão	69
4.6.4	Sistema de suspensão	69
4.6.5	Sistema de cambagem	70
4.6.6	Chassis	71
5	PROJETO PRELIMINAR	72
5.1	CHASSI	74
5.1.1	Perfil estrutural padrão em alumínio	75
5.1.2	Conexões usinadas	76
5.1.3	Componentes comerciais	77
5.1.4	Tamanho do chassi	78
5.2	CONJUNTO DE LOCOMOÇÃO	78
5.2.1	Roda	79
5.2.2	Mancal da roda	79
5.2.3	Garfo de cambagem	80
5.2.4	Mecanismo de direção e regulagem de altura	81
5.3	CONJUNTO DO SENSOR DE DISTÂNCIA	82
5.4	CONJUNTO DO SENSOR LASER	83
5.5	MONTAGEM FINAL	84
5.6	ORIENTAÇÕES SOBRE A UTILIZAÇÃO DO ROBÔ	86
5.7	CONSIDERAÇÕES SOBRE O LAYOUT FINAL	87
6	PROTÓTIPO	92
6.1	PROTÓTIPO SIMPLIFICADO	92
6.2	DETALHAMENTO DAS ALTERNATIVAS SIMPLIFICADAS DO PROTÓTIPO	93
6.2.1	Chassi e sistema de suspensão	93
6.2.2	Sistema direcional e de cambagem	94
6.3	CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO	96
6.3.1	Ferramentas utilizadas	96
6.3.2	Aquisição de componentes comerciais e matéria prima	96
6.3.3	Fabricação dos componentes	97

6.4	TESTES	98
6.4.1	Capacidade de conexão em superfícies curvas	98
6.4.2	Realização dos testes	99
6.4.3	Capacidade de carga do robô	101
6.5	CONSIDERAÇÕES SOBRE OS TESTES	106
7	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	108
7.1	CONCLUSÕES	108
7.2	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	109
8	REFERÊNCIAS	111
	APENDICE A PEÇAS ELETRÔNICAS	112
A.1	Motor de tração	112
A.2	Redutores	114
A.3	Encoder	116
A.4	Servo motor para as rodas direcionais	117
A.5	Servo motor para o sensor laser	118
A.6	Placa mãe	119
A.7	Driver do motor	120
A.8	Sensor inercial	121
A.9	Sensor de distância	122
A.10	Sensor laser	122
A.11	Câmera	123
	APENDICE B TABELA DE PEÇAS E REFERÊNCIAS	125
	APENDICE C SIMULAÇÕES EM SUPERFÍCIES CURVAS	127
C.1	SUPERFÍCIE CILINDRICA EXTERIOR VERTICAL EM ROTA LINEAR	127
C.2	SUPERFÍCIE CILINDRICA EXTERIOR VERTICAL EM CURVA DE RAIOS ZERO	127
C.3	SUPERFÍCIE CILINDRICA INTERIOR VERTICAL EM ROTA LINEAR	128
C.4	SUPERFÍCIE CILINDRICA INTERIOR VERTICAL EM CURVA DE RAIOS ZERO	129
C.5	SUPERFÍCIE CILINDRICA EXTERIOR HORIZONTAL EM ROTA LINEAR	129
C.6	SUPERFÍCIE CILINDRICA EXTERIOR HORIZONTAL EM CURVA DE RAIOS ZERO	130
C.7	SUPERFÍCIE CILINDRICA INTERIOR HORIZONTAL EM ROTA LINEAR	131
C.8	SUPERFÍCIE CILINDRICA INTERIOR HORIZONTAL EM CURVA DE RAIOS ZERO	132
C.9	SUPERFÍCIE ESFERICA EXTERIOR EM ROTA LINEAR	132
C.10	SUPERFÍCIE ESFERICA EXTERIOR EM CURVA DE RAIOS ZERO	133
C.11	SUPERFÍCIE ESFERICA INTERIOR EM ROTA LINEAR	133
C.12	SUPERFÍCIE ESFERICA INTERIOR EM CURVA DE RAIOS ZERO	134
C.13	CONSIDERAÇÕES	135
	ANEXO A DIREÇÃO DINÂMICA	136
	SISTEMA CINEMÁTICO	136
	ANEXO B ORÇAMENTOS PARA USINAGEM	138
	Orçamento 1:	138
	Orçamento 2:	138
	Orçamento 3:	138

1 INTRODUÇÃO

A soldagem é amplamente empregada na união de componentes de estruturas metálicas e de equipamentos para as finalidades mais diversas. As grandes vantagens da soldagem sobre os demais processos de união são a sua simplicidade e economia, uma vez que a execução das juntas soldadas requer quantidades relativamente pequenas de material (OKUMURA, 1982).

Os processos de soldagem têm um amplo campo de aplicação, incluindo, entre outros, construção naval, estruturas civis, vasos de pressão, tubulações, equipamentos diversos, usinas hidrelétricas, materiais metro e ferroviário, e componentes nucleares (*ibidem*).

1.1 CONTEXTO

A indústria petroquímica requer um rigoroso controle de qualidade e a inspeção de juntas soldadas pode evitar acidentes catastróficos, protegendo vidas e o meio ambiente. Por outro lado, ambientes agressivos e de difícil acesso tornam o monitoramento de algumas regiões complexo, tornando o processo de inspeção manual demorado, perigoso e, sobretudo, com alto custo para a empresa.

Atualmente, diversas técnicas de inspeção em metais fornecem resultados bastante precisos sobre integridade de metais, como por exemplo, a macro e micrografia. Como esses métodos exigem a existência de um corpo de prova, sua aplicação em peças únicas ou peças de campo é limitada. Ao longo das últimas décadas, foram desenvolvidas outras técnicas eficazes de ensaios não destrutivos (END) que permitem analisar sem comprometer a utilidade da peça. (DITCHBRUN *et al.*, 1996).

Uma variedade de END é utilizada para detecção, dimensionamento e avaliação de defeitos em juntas soldadas, sendo o ultrassom uma das mais importantes, devido à sua sensibilidade de detecção de descontinuidades. Por este motivo, tem se destacado como principal método de validação de estruturas soldadas (*ibidem*).

Nas refinarias de petróleo são utilizados tanques metálicos armazenamento do petróleo e seus derivados. Esses tanques podem ser cilíndricos ou esféricos e suas dimensões podem variar de cinco a 80 metros de diâmetro no caso do cilíndrico, de

acordo com a norma ABNT NBR 7821/1983 (1983, p. 65) Exemplos desses tanques podem ser vistos na Figura 1.



a) Tanque esférico

Fonte: LASI (2013)

b) Tanque cilíndrico

Fonte: Vetor Tecnologia (2013)

Figura 1 – Tipos de tanques

Os cordões de solda dos tanques necessitam de inspeção. Porém, algumas estruturas oferecem perigo ao serem inspecionadas manualmente, devido ao seu tamanho, formato e inclinação da superfície.

Para reduzir tempo de inspeção e eliminar o risco ao inspetor, robôs escaladores são utilizados para realizar a inspeção ao longo dos cordões de solda da estrutura.

1.2 OPORTUNIDADE DE PESQUISA

Evidenciou-se como oportunidade o desenvolvimento de um novo robô de inspeção de solda pelo Departamento de Mecânica da UTFPR, em parceria com o Departamento de Eletrônica e o CENPES da PETROBRAS, apresentando soluções às limitações da primeira geração do robô, que serão descritas na seção 3.8.1. A nova concepção também exige arquiteturas para a acomodação das peças adicionais definidas pelo Departamento de Eletrônica.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo do presente trabalho é conceber o projeto e construir o protótipo funcional da segunda geração do robô para inspeção de solda em superfícies metálicas verticais, inclinadas, cilíndricas e esféricas.

1.3.2 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo principal foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- a) Examinar os princípios funcionais de sistemas de tração e suspensão independentes (i.e. para cada par de rodas);
- b) Aprimorar, a partir de experimentos, o princípio de recobrimento da roda de modo a manter a integridade da superfície examinada;
- c) Garantir a disposição das peças no chassi de modo a obter um produto compacto sem comprometer a ventilação dos componentes eletrônicos;
- d) Definir o princípio de acabamento externo que desenvolva a função de proteção dos componentes eletrônicos internos e garanta uma apresentação visual comercializável.

1.4 JUSTIFICATIVA

A construção da segunda geração do robô de inspeção de solda visa, principalmente:

- a) Ampliar padrão de manobrabilidade do robô, permitindo locomoção ao longo dos cordões de solda;
- b) Ampliar o campo de aplicação da primeira geração do projeto permitindo inspeção de cordões de solda em superfícies cilíndricas e esféricas;
- c) Eliminar distorções no robô, oriundas de folgas construtivas;
- d) Assegurar posicionamento correto e funcional dos equipamentos eletrônicos embarcados.

1.5 METODOLOGIA ADOTADA

Neste projeto, a metodologia a ser empregada não se enquadra nos modelos clássicos de desenvolvimento de produto devido as seguintes características: i/ ter como base um projeto já desenvolvido; e ii/ requisitos pré-determinados pelo cliente e pelas outras áreas envolvidas no projeto, como a eletrônica e computação.

A literatura classifica a oportunidade evidenciada como projeto de produto por encomenda que tem como base as seguintes fases: projeto informacional, projeto conceitual, projeto preliminar e projeto detalhado (ROZENFELD, *et al.* 2006).

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

O Capítulo 1 introduz o leitor no ambiente do tema em discussão, inserindo-o ao seu contexto e apresentando a oportunidade identificada, os objetivos e a justificativa de escolha do tema.

O Capítulo 2 apresenta conceitos externos utilizados nos capítulos seguintes e proporciona um entendimento mais detalhado do tema proposto. Mostra um contexto focado nas soluções individuais de cada sistema disponível no mercado, estruturando o campo de solução do problema.

A análise da primeira geração do projeto desenvolvida por Rovani (2013), o detalhamento dos seus subsistemas, os pontos fortes e pontos fracos do robô de primeira geração estão contidos no Capítulo 3.

No Capítulo 4 detalha-se o desenvolvimento da segunda geração do robô, apresentando-se o seu *layout* e suas características funcionais.

O Capítulo 5 apresenta o projeto preliminar do robô e o Capítulo 6 mostra a construção do protótipo para prova de conceito e os testes executados.

2 SUBSISTEMAS MECÂNICOS DE ROBÔS

A maioria dos sistemas mecânicos locomotores apresenta um sistema mecânico complexo. Para facilitar o desenvolvimento ele pode ser dividido em duas ou mais sub funções, que são desempenhadas pelos respectivos subsistemas.

É importante esclarecer que um subsistema não deve ser compreendido como um subconjunto de peças. Um subconjunto pode realizar duas funções simultaneamente e, em alguns casos, dois subconjuntos podem realizar apenas uma função (e.g. roda do robô e o chassi podem realizar o sistema de suspensão de um veículo).

Por outro lado, um subsistema mecânico que desempenha uma determinada função, pode ser estabelecido por mais de um subconjunto de peças (e.g.: sistema de frenagem de um veículo que é construído pelo conjunto da roda, pedal de freio e o conjunto de tubulações de fluido de freio).

Indústrias automotivas, por exemplo, segmentam os subsistemas durante a pesquisa e o início do desenvolvimento de veículos. A fabricação, em alguns casos, separa os subconjuntos durante o processo de fabricação. Nessas empresas é comum encontrar departamentos inteiros de engenharia dedicados a sistemas de freio, suspensão, motores, entre outros. Por outro lado, podem existir linhas de produção paralelas para montagem de subconjuntos, como por exemplo, o eixo traseiro de um automóvel.

A parte mecânica de um robô desempenha uma função semelhante ao automóvel: a locomoção. Alguns subsistemas mecânicos devem existir para garantir a locomoção e outras funções do sistema robótico.

De um modo geral, podem-se citar cinco subsistemas dinâmicos e um sistema estrutural que são essenciais para um robô desempenhar a função de locomoção.

Daqui em diante, sempre que possível, o trabalho será dividido nesses subsistemas mecânicos principais, numerados de 1 a 6, para facilitar o entendimento. Quando for necessário, também será utilizada uma nomenclatura baseada nos subconjuntos.

Os seis subsistemas principais são:

1. Sistema de Direção;
2. Sistema de Tração;
3. Sistema de Conexão;
4. Sistema de Suspensão;
5. Sistema de Cambagem;
6. Sistema Estrutural (chassi).

Neste capítulo será apresentado um conceito introdutório para esses seis subsistemas mecânicos principais e a forma como eles se relacionam.

2.1 SISTEMA DE DIREÇÃO

Um robô que se movimenta através de tração nas rodas, necessita de um mecanismo para realizar manobras.

Em um trajeto curvilíneo qualquer, as rodas do robô percorrem curvas com raios de tamanhos diferentes. Portanto, evitar ou diminuir derrapagens se torna interessante para um sistema de direção que não possui um sistema de controle para correção da direção.

Esses deslizamentos, geralmente são imprevisíveis e dificultam obter precisão da trajetória do robô. Como solução uma condição cinemática para evitar derrapagens das rodas deve ser satisfeita. Essa condição é chamada de condição de Ackerman, ou *Ackerman steering*.

A condição de Ackerman define que, em uma situação de trajeto curvilíneo, o direcionamento das rodas que percorrem curvas de tamanhos diferentes, possuam seus raios partindo de um mesmo ponto. Conforme é mostrado na Figura 2, os prolongamentos das linhas de centro das quatro rodas se encontram no ponto O, que coincide com o centro da trajetória curvilínea de cada uma delas. Essa condição permite que as rodas realizem curvas sem escorregamento, mesmo havendo diferença de velocidades entre as mesmas. O conceito da condição de Ackerman está descrito com detalhes no ANEXO A.

O desrespeito à condição de Ackerman, obrigatoriamente irá resultar em derrapagem de uma ou mais rodas. Em robôs que utilizam rodas magnéticas, os danos podem ser irreversíveis. A força normal aplicada pela força magnética aumenta a força de atrito. Isso dificulta o escorregamento e, conseqüentemente, se a força de atrito superar a tensão de escoamento do material, a estrutura do chassi sofrerá deformações plásticas durante a tentativa de manobra.

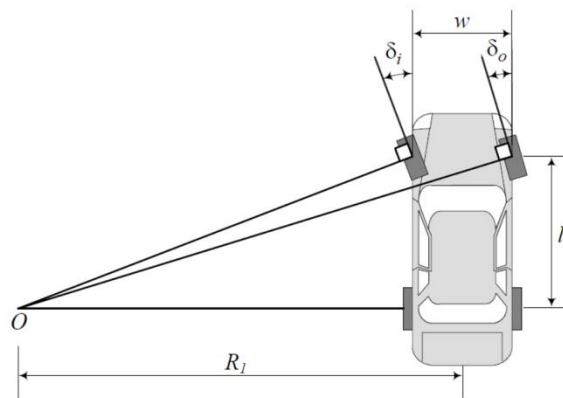


Figura 2 – Veículo com rodas direcionais dianteiras e a condição de Ackerman.

Fonte: Secchi (2012)

Existem vários tipos de rodas para robôs. As rodas convencionais podem ser divididas em três categorias (SECCHI, 2012):

- a) Rodas fixas: com apenas um grau de liberdade destinado ao deslocamento do robô se movimentam apenas em torno de um de seus eixos. Podem ou não ser tratoras;
- b) Rodas direcionais centralizadas: tem dois graus de liberdade destinados ao movimento do robô. A rotação sobre o eixo vertical desempenha o papel de direcionamento é orientada por um servo-trator; e a rotação sobre um de seus eixos horizontais que é responsável pelo deslocamento do robô. Este último pode ou não ser tracionado;
- c) Rodas direcionais não centralizadas (roda louca): similar à roda direcional centralizada, possui dois graus de liberdade destinados ao movimento do robô. Porém, o eixo vertical não contém, necessariamente, o centro

geométrico da roda. Geralmente, as rodas direcionais não centralizadas não possuem tração nem direcionamento próprio.

Os três tipos de rodas estão ilustrados na Figura 3.

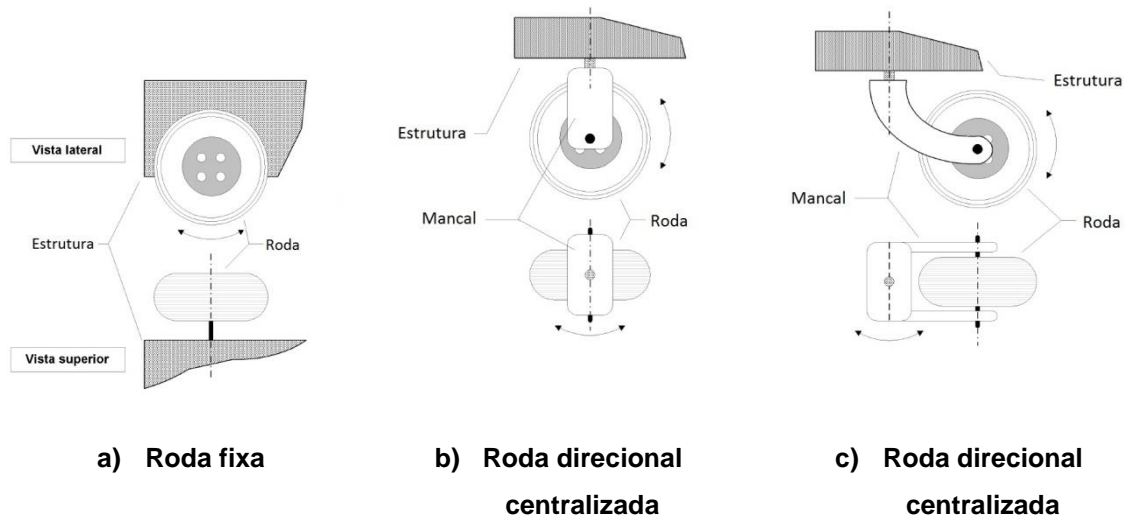


Figura 3 – Tipos de rodas

Fonte: Secchi (2012)

Outros graus de liberdade podem existir para permitir o contato entre as rodas e o terreno, mas que não influenciam diretamente no movimento. Como exemplo, pode ser citado o movimento linear vertical, utilizado pelo sistema de suspensão, e a inclinação do eixo de rotação, responsável pela cambagem da roda.

Assumindo-se a necessidade do respeito à condição de Ackerman, o mecanismo direcional deve ser escolhido a partir da topologia selecionada.

Considerando a combinação dos diversos tipos de rodas, os principais sistemas direcionais podem ser classificados conforme a seguir:

2.1.1 Omnidirecional

São sistemas com todas as suas rodas direcionais, centralizadas ou não centralizadas (Figura 4). Possuem máxima manobrabilidade no plano. São capazes de se orientar sem a necessidade de ocorrência de movimento linear, ao girar em torno do próprio eixo (SECCHI, 2012).



Figura 4 – Robô omnidirecional com rodas direcionais centralizadas

Fonte: Secchi (2012)

2.1.2 Uniciclo

Possui uma estrutura formada por duas rodas fixas e uma roda louca. A direção se dá pela diferença de velocidade entre as duas rodas fixas. É o mais simples sistema cinemático direcional (SECCHI, 2012).

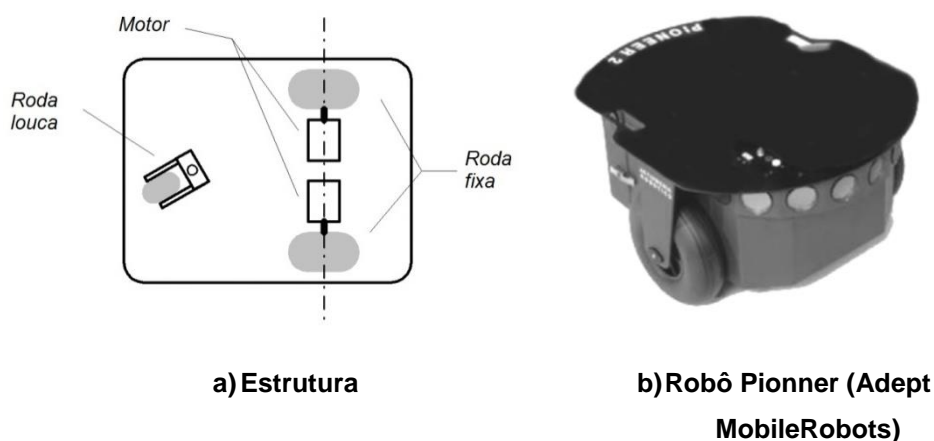
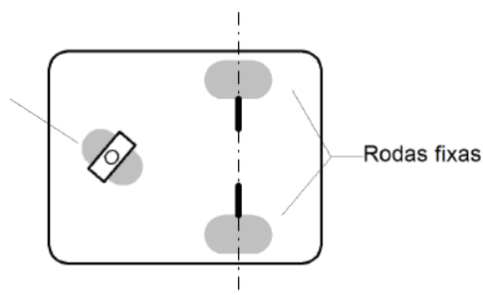


Figura 5 – Uniciclo

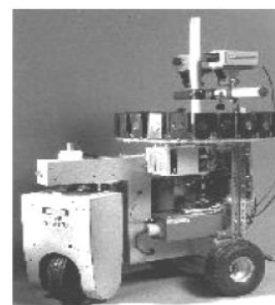
Fonte: Secchi (2012)

2.1.3 Triciclo

Possui o arranjo geométrico das rodas semelhante ao uniclo. É composto por duas rodas fixas sem tração e uma roda direcional tratora (SECCHI, 2012).



a) Estrutura



b) Robô Meptune (Universidade Carnegie Mellon).

Figura 6 – Triciclo
 Fonte: Secchi (2012)

2.1.4 Quadriciclo

O quadriciclo, representado pela Figura 7, possui duas rodas fixas no eixo traseiro e duas rodas direcionais no eixo dianteiro. A tração pode ser no eixo traseiro, no eixo dianteiro direcional ou em ambos.

Possui uma cinemática mais complexa que os robôs de três rodas. Deve existir um cuidado especial com a condição de Ackerman (SECCHI, 2012).

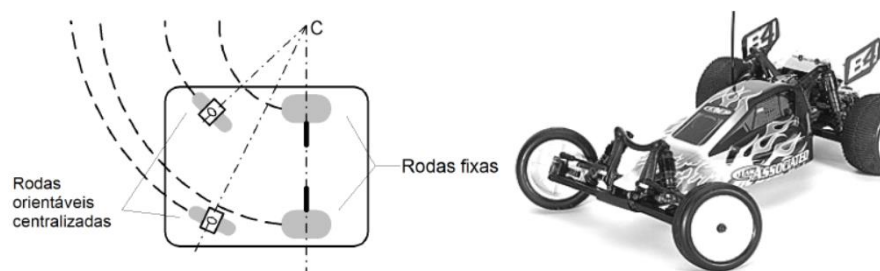


Figura 7 – Quadriciclo. Sistema de condição de Ackerman.

Fonte: Secchi (2012)

2.2 SISTEMA DE TRAÇÃO

Em geral, os robôs possuem seus sistemas de tração e direção distribuídos sobre os eixos de suas próprias rodas.

O sistema de tração deve ser escolhido de acordo com a precisão e rapidez do movimento, sempre respeitando as exigências de velocidade, manobrabilidade e as condições do terreno.

Para sistemas de tração com quatro rodas, existem três sistemas básicos de tração, dos quais podem surgir diferentes configurações. São eles: i/ tração em eixos independentes; ii/ tração em lados independentes; iii/ tração em rodas independentes.

2.2.1 Tração em eixos independentes

É realizada através de eixos que ligam as rodas em pares. A tração dos eixos dianteiros e traseiros é controlada de forma independente. Pode haver tração no eixo traseiro, no eixo dianteiro ou em ambos os eixos. As variações podem ser ainda maiores quando se consideram outros tipos de topologia.

Durante a realização de curvas, um sistema diferencial pode ser adotado. Esse sistema configura rotações diferentes para as rodas permitindo trajetórias curvilíneas com raios diferentes sem derrapagem entre elas (Figura 8).



Figura 8 – Eixo diferencia traseiro

Fonte: Dana (2015)

2.2.2 Tração em lados independentes

Nesse caso, as rodas são ligadas por correias ou esteiras. A sincronia se dá pela ligação das rodas do lado direito e pela ligação das rodas do lado esquerdo. Para esses modelos é normal que o direcionamento seja dado pelo movimento relativo das esteiras ou correias.

O robô de inspeção de solda de primeira geração desenvolvido por Rovani (2013) utiliza-se deste conceito de transmissão de tração (Figura 9).

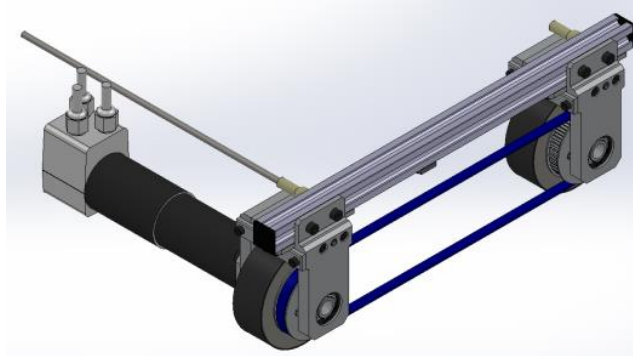


Figura 9 – Tração através de correias

Fonte: Rovani (2013)

2.2.3 Tração em rodas independentes

Esse é o tipo de tração mais complexo, pois exige um sistema individual de controle e tração, exceto nas rodas direcionais não centralizadas. Apesar de individuais, as rodas independentes devem funcionar em sincronia, o que torna a eletrônica e o algoritmo deste sistema de tração mais complexo.



Figura 10 – Robô da NASA *Curiosity rover* utilizado na missão *Mars Science Laboratory* em 2012

Fonte: Nasa (2015)

2.3 SISTEMA DE CONEXÃO

O ambiente de trabalho é a característica que mais impõe restrições sobre um robô, sobretudo para os sistemas de conexão, suspensão e cambagem.

Ao desempenhar qualquer função em posições desfavoráveis ao campo gravitacional, um sistema de conexão deve existir para permitir deslocamento do robô na posição vertical e sobre cabeça.

Um caminho guiado pode ser solução para robôs que executem sempre a mesma trajetória. Porém, a trajetória do robô fica limitada à que foi especificada ainda no projeto.

Dois sistemas de conexão são bastante conhecidos pela robótica e garantem maior versatilidade ao robô; i/ fixação do robô por ventosas e ii/ conexão através de um campo magnético.

Ao se utilizar de fixação através de ventosas, a principal limitação é quanto à utilização de rodas para o movimento. Esse tipo de fixação, normalmente, está associado ao sistema de locomoção através de pernas.

Um sistema de conexão através de campo magnético pode ser utilizado para locomoção através de pernas ou rodas. Porém, é imperativo que a superfície de circulação do robô seja ferromagnética.

2.4 SISTEMA DE SUSPENSÃO

As principais funções do sistema de suspensão é absorver os impactos causados pelas oscilações e acondicionar o robô às variações de forma da superfície, transmitindo a menos vibrações para o chassi.

Os tipos de suspensão para Robôs podem ser classificados como: i/ suspensão passiva; ii/ suspensão ativa; iii/ suspensão com barra de torção; iv/ suspensão por tandem.

2.4.1 Suspensão passiva

O comportamento da suspensão é determinado pelo terreno. O movimento vertical do sistema é dado como resposta às variações da superfície que o robô

estiver transitando, de forma que haja armazenamento, dissipação ou transferência de energia.

De um modo geral, a suspensão passiva é composta por um sistema mola-amortecedor. A mola armazena a energia cinética oriunda dos impactos das irregularidades do terreno e o amortecedor dissipa essa energia a fim de eliminar as vibrações.

2.4.2 **Suspensão ativa**

A suspensão ativa trabalha de acordo com as informações coletados do ambiente. Sensores identificam variações na superfície e atuadores empregam os movimentos necessários para as correções necessárias. O sistema de suspensão ativa é capaz de corrigir as variações de terreno com mais eficiência que o sistema de suspensão passiva. Porém, a complexidade o torna mais caro e exige manutenções mais frequentes.

2.4.3 **Suspensão com barra de torção**

Uma variação da suspensão passiva é a suspensão que possui uma barra de torção para ligação das suspensões frontais ou traseiras.

Esse sistema é muito utilizado em veículos que atingem altas velocidades. Também chamada de barra estabilizadora, a barra de torção obriga os dois sistemas ligados a oscilar em sincronia. Esse fenômeno fornece mais estabilidade ao veículo.

2.4.4 **Suspensão por tandem**

Similar ao sistema de suspensão individual com barra de torção, o sistema de suspensão por tandem, também faz conexão entre duas rodas. Porém o sistema tandem sincroniza o movimento das suspensões adjacentes e não das rodas frontais ou traseiras.

O chassi é fixado ao sistema tandem por um eixo no centro da barra de ligação que inverte o sentido dos deslocamentos verticais das rodas em relação ao seu centro. Dessa forma, a amplitude do deslocamento vertical do chassi será sempre a metade da soma dos deslocamentos verticais das rodas. Quando apenas uma roda ultrapassar um obstáculo de altura H , por exemplo, o deslocamento vertical do chassi de $H/2$, conforme mostrado na Figura 11.

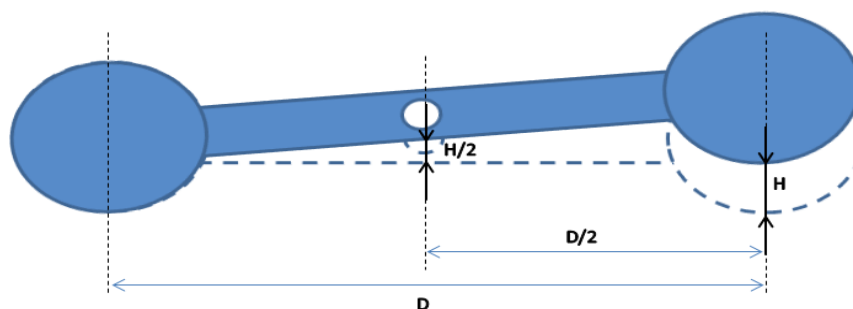


Figura 11 – Representação geométrica do sistema tandem.¹

Essa solução é interessante quando o sistema opera na posição sobre cabeça, porque mantém a mesma distância do chassi à superfície. Uma suspensão individual do tipo mola-amortecedor assumiria pontos de equilíbrio distintos para cada posição, o que pode limitar a aplicabilidade de um robô.

2.5 SISTEMA DE CAMBAGEM

A cambagem é a inclinação da roda em relação ao plano vertical do veículo. Em automóveis o sistema de cambagem tem várias utilidades como: estabilidade, diminuir desgaste dos pneus e reduzir o consumo de combustível. Em robôs que não assumem velocidades elevadas, a cambagem se restringe a compensar a forma e as irregularidades do terreno.

Assim como a suspensão, o sistema de cambagem pode ser passivo ou ativo.

2.5.1 Cambagem ativa

A cambagem ativa é utilizada principalmente em automóveis. A inclinação das rodas é associada ao sistema de direção e suspensão para auxiliar a estabilidade do veículo em curvas.

2.5.2 Cambagem passiva

A cambagem passiva possui seu ângulo livre para se ajustar às imperfeições e ondulações do terreno. Esse grau de liberdade permite que a roda fique sempre normal a superfície, ou seja, quando a roda está em um solo com geometria não

¹ Todas as figuras sem regência de fonte foram produzidas pelos alunos Alexandre Bianchi Rosa e Ronaldo Gnoatto.

plana, o ângulo de cambagem se ajusta em resposta à inclinação ou imperfeição da superfície para melhorar o contato.

2.6 SISTEMA ESTRUTURAL (CHASSI)

O chassi é o elemento de ligação que conecta os principais componentes do robô como os cinco subsistemas apresentados neste capítulo.

A principal função do chassi é a estrutural. Em casos específicos ele pode assumir outras funções como: proteção, suspensão e absorção de energia.

2.7 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS SUBSISTEMAS MECÂNICOS

Outros subsistemas podem ser agregados aos robôs, de acordo com a sua função específica. Somando-se aos subsistemas principais, descritos nesse capítulo, eles devem compartilhar o mesmo espaço, em algumas vezes, as mesmas peças. A integração desses subsistemas e a forma como eles se relacionam são etapas importantes do desenvolvimento. Nos próximos capítulos serão apresentadas as soluções propostas pela primeira e segunda geração do robô.

3 ANÁLISE DA PRIMEIRA GERAÇÃO DO ROBÔ

Neste capítulo será apresentado o refinamento do projeto de Buch e Souza (2010) e protótipo da primeira geração do robô de inspeção de solda de Rovani (2013), assim como suas principais características e limitações.

3.1 SISTEMA DE DIREÇÃO

As rodas da primeira geração do robô não possuem um sistema de direção propriamente dito. As rodas são do tipo fixas e são conectadas diretamente no sistema de suspensão tandem, sem grau de liberdade para orientação.

Conforme é discutido na seção 3.2, a tração das rodas é realizada por dois motores e sincronizada lateralmente através de duas correias. O direcionamento do robô acontece, apenas, imprimindo rotações diferentes nos pares de rodas de lados opostos.

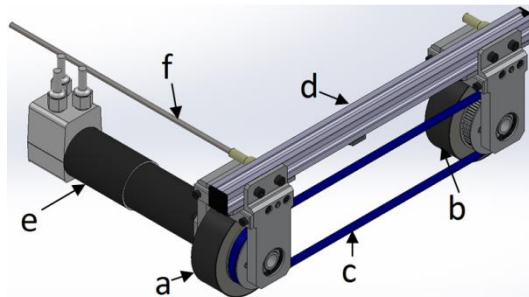


Figura 12 – Sistema de direção e tração da primeira geração do robô.

Fonte: Rovani (2013)

Esse sistema de direção não respeita a condição de direcionamento de Ackerman. As rodas são fixas e paralelas. Os prolongamentos de seus eixos, também paralelos, não possuem ponto em comum, obrigando o sistema a escorregar durante a realização de curvas.

Quando o sistema experimenta a diferença de rotação entre as rodas, é o escorregamento lateral que faz a função de reorientação. Na Figura 13 um exemplo do comportamento das rodas durante a realização de curvas.

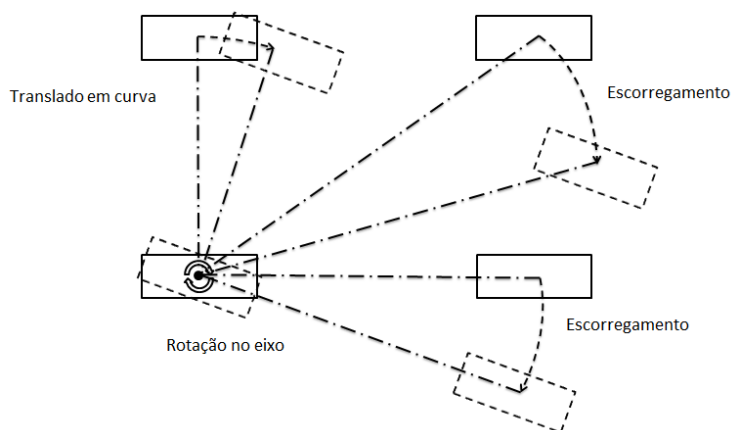


Figura 13 – Escorregamento das rodas traseiras durante a realização de curvas.

Na prática, o escorregamento não ocorre exatamente da forma como está esboçado na Figura 13. É impossível prever qual das quatro rodas sofrerá rotação no próprio eixo e, na maioria das vezes, as quatro rodas compartilham, simultaneamente, rotação, translação e escorregamento, o que dificulta ainda mais a previsão do posicionamento do robô.

Testes realizados com a primeira geração em uma parede plana mostram que o robô não consegue manter a trajetória programada durante a realização de curva. Na Figura 14 verificam-se as trajetórias realizadas pelo robô escalando uma parede metálica com os raios realizados diferentes dos programados.

Verificou-se que o raio medido através das marcas deixadas pelas rodas do robô na parede, são maiores que os raios programados para a sua execução.

Na Tabela 1 pode-se observar essa diferença e o erro relativo para cada uma das curvas.

Tabela 1 – Erro relativo da trajetória do robô durante a realização de curvas

<i>Sentido da curva</i>	<i>Raio Programado (mm)</i>	<i>Raio Medido (mm)</i>	<i>Erro relativo</i>
À direita	500	1128	126%
À direita	800	1720	115%
À direita	1000	2121	112%
À esquerda	1500	5257	250%

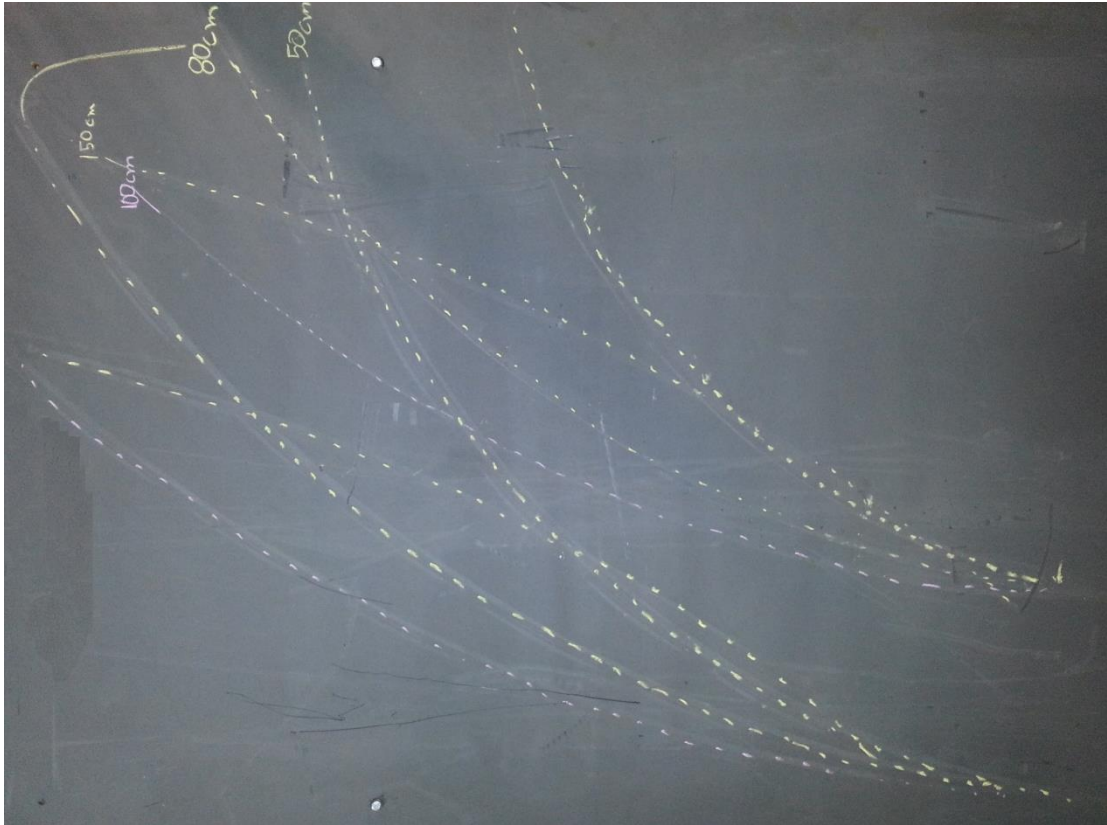


Figura 14 – Trajetória real das rodas do robô e trajetória programada.

Além de o erro relativo ser significativo, o teste mostrou que o robô se comporta de forma diferente quando se inverte o sentido da curva. Em curvas realizadas para a direita, o erro relativo médio foi de 118%. Em curvas realizadas para a esquerda, o erro relativo foi de 250%. Essa diferença pode ser explicada pela geometria formada pelo desalinhamento das rodas, que intensifica o efeito de escorregamento quando a curva é realizada para a esquerda.

Apesar da magnitude do erro relativo, observa-se um padrão nos valores de escorregamento quando a curva é realizada para o lado direito. Porém, o robô não dispõe de um sistema de controle para corrigir o erro gerado e uma pequena diferença no padrão pode ser responsável para o robô assumir uma trajetória diferente.

Adicionalmente à dificuldade de controle, observou-se que o aumento da força magnética das rodas desenvolvidas por Rovani (2013), resultou no aumento da força de atrito. A força de atrito dificultou a reorientação através do escorregamento e

gerou deformações na estrutura do robô, contribuindo para o surgimento prematuro de folgas nas fixações.

3.2 SISTEMA DE TRAÇÃO

O sistema de tração existente na primeira geração é o sistema de Tração em lados independentes, mostrado na Figura 12 da seção 3.1.

Esse sistema é composto por duas estruturas rígidas, uma de cada lado, formadas por duas rodas magnéticas, uma motora e uma movida, ligadas pelo perfil estrutural. Os pares de rodas estão ligeiramente desalinhados e, cada par é sincronizado por uma correia para transmissão.

O torque para o giro da roda é gerado por dois motores e dois redutores elétricos, conectados diretamente às rodas motoras.

3.3 SISTEMA DE CONEXÃO

Um par de ímãs permanentes arranjado no interior das rodas gera o campo magnético responsável pela fixação do robô (Figura 15).

Rovani (2013) realizou um estudo abrangente sobre o magnetismo e desenvolveu as rodas com ímãs anelares que apresentaram desempenho bastante satisfatório.

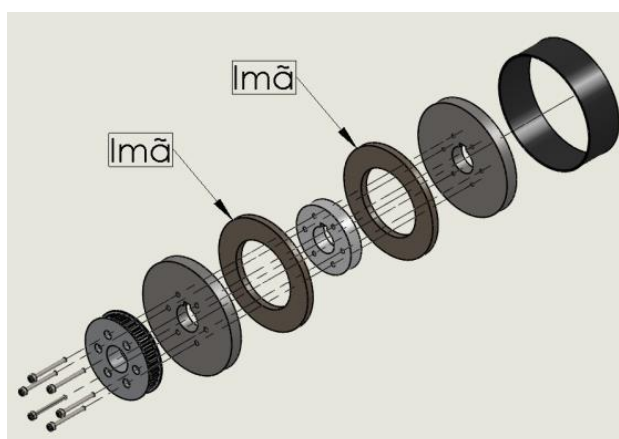


Figura 15 – Vista explodida da roda desenvolvida por Rovani (2013).

Fonte: Rovani (2013)

A disposição dos ímãs anelares entre as pastilhas de aço possibilitou um campo magnético intenso que resultou numa força de atração muito superior à roda desenvolvida pelo robô do CENPES. Na Tabela 2 são mostrados os valores da força magnética encontrados durante o ensaio de descolamentos da roda.

Tabela 2 – Força de descolamento das rodas magnéticas

<i>Roda Rovani (2013)</i>	<i>1ª Medição</i>	<i>2ª Medição</i>	<i>3ª Medição</i>	<i>Média</i>
Força de conexão	44,7 kgf	43,6 kgf	44,9 kgf	44,4 kgf

Fonte: Rovani (2013)

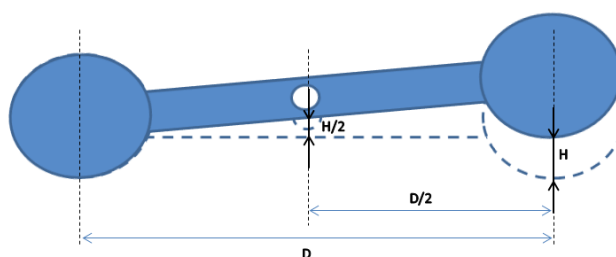
As rodas são recobertas por um polímero de alta densidade, para evitar degradação da superfície transitada. Durante o desenvolvimento da primeira geração não foram realizados testes para validar a eficácia da cobertura. Para utilização da roda e a cobertura no robô de segunda geração verificou-se a necessidade de realizar esses testes. Os resultados podem ser vistos na seção 3.7.

3.4 SISTEMA DE SUSPENSÃO

O sistema de suspensão utilizado é a suspensão passiva guiada pelo sistema tandem, mostrado na seção 2.4.1 e 2.4.4. O conjunto tandem utilizado na primeira geração pode ser observado na Figura 16.



a) Sistema tandem utilizado por Rovani (2013)

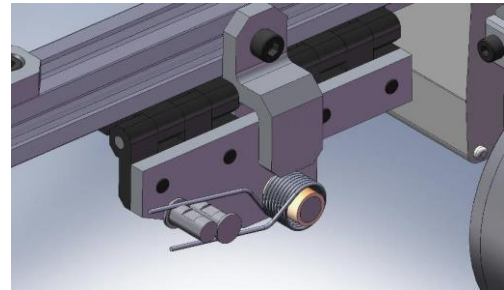
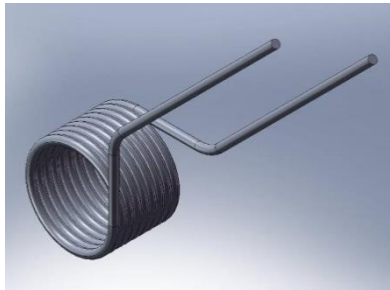


b) Representação geométrica do sistema tandem

Figura 16 – Sistema de suspensão tandem

A suspensão por tandem garante ao robô sempre a mesma altura do chassi em relação à superfície transitada. Essa característica é fundamental para que a função de leitura de dados, que a régua do ultrassom irá desenvolver, seja desempenhada da mesma forma nas posições normal e sobre cabeça.

O eixo tandem delimita o movimento da suspensão. Existe, também, uma mola de torção para o retorno do movimento do chassi para posição de equilíbrio horizontal (Figura 17 a e Figura 17 b). O amortecimento é gerado apenas pelo atrito da articulação.



a) Mola selecionada para o projeto

b) Corte destacando a mola de torção

Figura 17 – Mola de torção do sistema tandem do robô de primeira geração

Fonte: Rovani (2013)

A escolha do sistema de suspensão tandem atende às solicitações de utilização do robô porque mantém um padrão de altura para o chassi. Porém, a mola de torção não retorna o chassi para a posição horizontal. Durante a análise do protótipo, evidenciou-se que o atrito gerado pelas fixações gera um amortecimento muito elevado, tornando o sistema superamortecido e a força de excitação da mola de torção é insuficiente para retornar o eixo tandem à posição de equilíbrio horizontal.

3.5 SISTEMA DE CÂMBER

O sistema de câmber utilizado é semelhante à cambagem passiva descrita na seção 2.5.2. Porém, ela é fixa e regulável. O ângulo de cambagem é definido pela rotação do conjunto tandem mostrado na Figura 17 através de duas dobradiças, conforme mostrado na Figura 18.

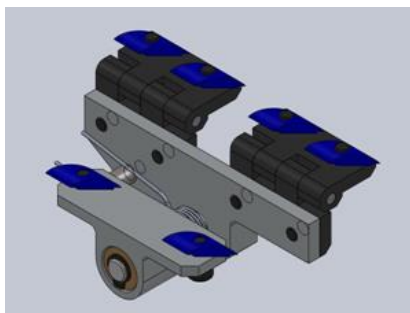
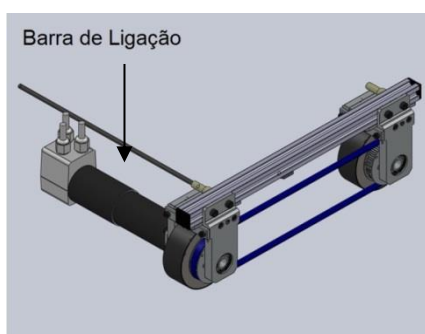


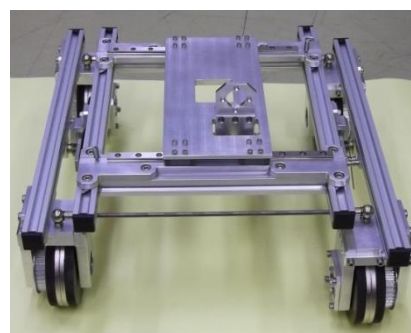
Figura 18 – Mecanismo de cambagem da primeira geração do robô.

Fonte: Rovani (2013)

As dobradiças são fixadas aos perfis laterais do chassi. Os pares de rodas laterais adquirem um grau de liberdade e permitem que o sistema se acomode na superfície transitada através da regulagem da barra de ligação rosqueada. A barra de ligação tem perfil sextavado e faz a ligação dos pares de cambagem, tornando-a fixa (Figura 19).



a) Montagem 3D com a barra de ligação rosqueada.



b) Pré-montagem do robô com a barra de ligação rosqueada.

Figura 19 – Barra de ligação rosqueada.

Fonte: Rovani (2013)

As barras possuem roscas em ambos os lados. Porém uma das roscas possui hélice à esquerda para permitir que ao girar a barra, o seu comprimento funcional aumente ou diminua. O ajuste do comprimento funcional das barras de ligação roscadas abre ou fecha mecanismo de cambagem, possibilitando a regulagem para o tipo de superfície escolhida, seja plana ou cilíndrica.

O eixo de giro da cambagem está a 115 mm da superfície de rolagem. Por causa dessa distância, qualquer ajuste necessita de escorregamento lateral das rodas (Figura 20).

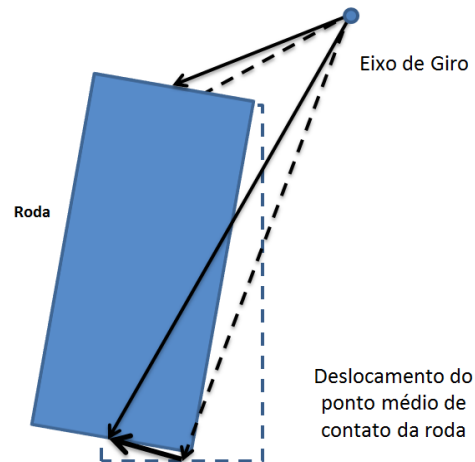


Figura 20 – Ponto de cambagem alto.

Esse detalhe impossibilita a retirada da barra de ligação rosca para utilizar a cambagem regulável como cambagem passiva. O aumento da força de atração magnética das rodas faz com que qualquer escorregamento ocorra com dificuldade.

A distância de 115 mm entre o eixo de giro da cambagem e a superfície, gera deslocamentos do ponto de contato da roda maiores à medida que aumenta o ângulo da cambagem passiva. A resistência impressa pela força magnética faz com que os esforços sejam transmitidos para o chassi.

3.6 CHASSI

A estrutura mecânica do robô é produzida de componentes comerciais (e.g. perfis estruturais de alumínio, dobradiças, pinos, molas, parafusos e porcas), e componentes fabricados (e.g. suportes usinados em alumínio,).

A estrutura é rígida e os perfis comerciais são os principais responsáveis pela redução da massa total (Figura 21). Seu formato é retangular (a) e possui uma mesa de inspeção (b) que se desloca nos perfis transversalmente a direção de deslocamento do robô (c).

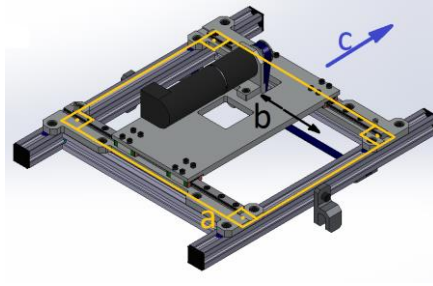


Figura 21 – Chassi do robô primeira geração.

Fonte: Rovani (2013)

Nos perfis estruturais são fixados os componentes eletrônicos de inspeção e navegação. Nas laterais do chassi, é fixado o sistema de articulação da cambagem e suspensão.

Os testes realizados pelo departamento de eletrônica mostraram que ocorreram folgas nas conexões e deformações do perfil estrutural. Porém, a causa dos problemas encontrados não pode ser associada diretamente ao chassi. Conforme foi apresentado no capítulo 2, o não respeito na condição de Ackerman, gera escorregamento das rodas que é dificultado pela elevada força magnética e transmite os esforços para o chassi.

3.7 TESTES REALIZADOS

Conforme mencionado na seção 3.3, o sistema de conexão desenvolvido por Rovani (2013) apresentou resultados bastante satisfatórios. A roda magnética desenvolvida passou por uma série de testes antes de ter a sua utilização no robô de segunda geração aprovada. Parâmetros empíricos foram levantados para os cálculos de descolamento, aderência e desgaste da cobertura da roda atual.

Foi utilizada a roda fabricada durante o desenvolvimento da primeira geração, apenas refazendo a cobertura polimérica, dentro dos padrões definidos por Rovani (2013). Os testes foram realizados no laboratório de usinagem da UTFPR pelos alunos Alexandre Bianchi Rosa e Ronaldo Antonio Gnoatto entre os dias 18 e 22 de novembro de 2013.

3.7.1 Força de atrito em deslizamento longitudinal (FadL)

3.7.1.1 Objetivo: FadL

O objetivo deste teste foi medir a força de atrito estático entre as rodas e uma calota esférica de aço com a superfície suja e limpa. A força de atrito será utilizada para calcular a força de deslizamento do robô em paredes verticais.

3.7.1.2 Ferramentas e equipamentos utilizados: FadL

- a) Uma balança digital com resolução de 0,1kgf e capacidade de 50 kgf;
- b) Duas cunhas de madeira;
- c) Uma corda com elasticidade de 0,2%.

3.7.1.3 Componentes utilizados: FadL

- a) Uma das laterais do sistema de locomoção da primeira geração do robô, sem motor, correia sincronizadora e sistema de cambagem e suspensão;
- b) Uma calota esférica retirada de um tanque, fornecida pelo CENPES, com espessura de 50,8 mm e um cordão de solda central.

3.7.1.4 Set-up: FadL

Uma das laterais do robô de primeira geração posicionada na horizontal, conectada a calota esférica, é tracionada pela corda presa ao centro da roda. A balança digital traciona o conjunto até registrar o valor em que começa o escorregamento (Figura 22)

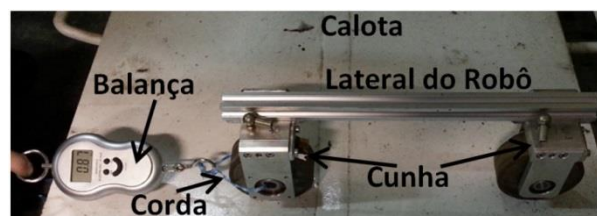


Figura 22 – Teste de força de atrito em deslizamento longitudinal.

3.7.1.5 Método: FadL

Para fazer a leitura da força de atrito em deslizamento longitudinal, as rodas devem ser tracionadas sobre a superfície de contato quando estão travadas, simulando o torque de travamento do motor.

Observação: o momento gerado pela distância entre o ponto de aplicação da força pela corda e a superfície de contato aumenta a força normal da roda da frente e diminui a força da roda traseira. Desconsiderou-se essa variação fazendo o cálculo da força de atrito média entre as duas rodas.

Aplicando a força gradualmente na balança, observa-se o valor medido imediatamente antes de ocorrer o escorregamento.

O teste foi repetido cinco vezes para a superfície suja e cinco vezes com a superfície limpa.

3.7.1.6 Cálculos: F_{adL}

A força registrada pela balança em kgf, é igual ao somatório das forças de atrito atuantes nas rodas 1 e 2.

Devido ao momento gerado no conjunto ao ser tracionado num ponto afastado do ponto de contato das rodas com a superfície, as rodas têm suas forças normais diferentes. Porém, essa diferença é simétrica, positiva para uma roda e negativa para a outra, conforme DCL da Figura 23.

Sendo $F_{balança}$ a força registrada pela balança; $F_{a_{roda1}}$ e $F_{a_{roda2}}$, as forças de atrito atuantes nas rodas 1 e 2, respectivamente; F_{mag} a força magnética de conexão das rodas (iguais) e F_{mom} a força em cada roda que reage ao momento gerado pela força da balança, aplicada fora da linha dos pontos de conexão das rodas com a superfície.

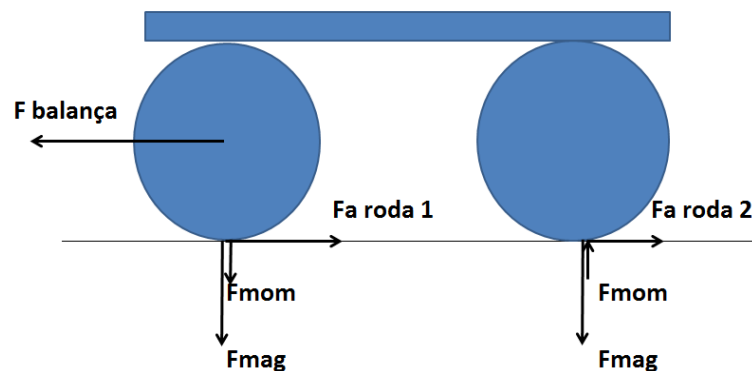


Figura 23 – DCL das forças durante deslizamento longitudinal

$$\begin{aligned}
 F_{balan\c{c}a} &= F_{a_{roda1}} + F_{a_{roda2}} \\
 F_{a_{roda1}} &= (F_{mag} + F_{mom}) \times \mu \\
 F_{a_{roda2}} &= (F_{mag} - F_{mom}) \times \mu \\
 F_{balan\c{c}a} &= (F_{mag} + F_{mom}) \times \mu + (F_{mag} - F_{mom}) \times \mu \\
 F_{balan\c{c}a} &= 2 \times F_{mag} \times \mu
 \end{aligned}$$

Sendo F_{adL} a força de atrito atuante em uma roda;

$$F_{adL} = F_{mag} \times \mu$$

Logo,

$$F_{balan\c{c}a} = 2 \times F_{adL}$$

Assim, a força de atrito de escorregamento longitudinal de uma roda é a metade da força registrada pela balança antes de iniciar o deslizamento.

3.7.1.7 Resultados obtidos: F_{adL}

Na Tabela 3 são apresentados os valores de força de atrito em deslizamento longitudinal para uma roda em superfície limpa e suja.

Tabela 3 – Força de atrito longitudinal em superfície suja e limpa

Medição	Superfície Limpa [kgf]	Superfície Suja [kgf]
Fad 1	13	12,5
Fad 2	13,5	13
Fad 3	13	12
Fad 4	14	12
Fad 5	13,5	13

A condição de superfície suja é determinada apenas pela poeira e resíduos acumulados devido à exposição da superfície ao tempo. A condição de superfície limpa foi alcançada removendo os resíduos com pano seco.

A F_{adL} média de cada roda é igual a 12,5 kgf para a superfície suja e 13,4 kgf para a superfície limpa. O desvio padrão é de 0,42 kgf para a superfície suja e de 0,58 kgf para a superfície limpa.

3.7.2 Força de atrito em deslizamento lateral (F_{adLt})

3.7.2.1 Objetivo: F_{adLt}

Objetivo deste teste foi confirmar semelhança dos valores da força de atrito lateral com a força de atrito longitudinal, uma vez que a força normal e área de contato são as mesmas. A força de atrito lateral também será utilizada para calcular a força de deslizamento do robô em paredes verticais ao se deslocar horizontalmente.

3.7.2.2 Ferramentas e equipamentos utilizados: F_{adLt}

- a) Uma balança digital com resolução de 0,1kgf e capacidade de 50 kgf;
- b) Uma barra quadrada de madeira;
- c) Uma corda com elasticidade de 0,2%.

3.7.2.3 Componentes utilizados: F_{adLt}

- a) Uma roda da primeira geração do robô;
- b) Uma calota esférica.

3.7.2.4 Set-up: F_{adLt}

Conforme Figura 24, à roda foi conectada a calota esférica, com uma barra de madeira apoiada sobre a superfície metálica e na lateral da roda.

A corda foi atada nas laterais da barra de madeira e na balança, traciona o conjunto aplicando a força próximo ao ponto de contato da roda com a superfície da calota.

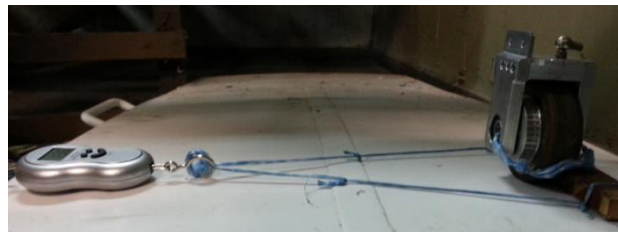


Figura 24 – Teste de força de atrito em deslizamento lateral

3.7.2.5 Método: F_{adLt}

Utilizando essa configuração, a carga registrada na balança reflete a força de atrito atuante na roda. Para determinar seu valor máximo, a força de tração na

balança foi aumentada gradualmente, até o início do deslizamento. O maior valor foi registrado. Este teste foi repetido cinco vezes para a superfície limpa e cinco vezes para a superfície suja.

3.7.2.6 Cálculos: F_{adLt}

$$F_{balança} = F_{adLt}$$

$$F_{adLt} = F_{mag} \times \mu$$

3.7.2.7 Resultados obtidos: F_{adLt}

Na Tabela 4 são apresentados os valores de força de atrito em deslizamento longitudinal para uma roda em superfície limpa e suja.

Tabela 4 – Força de atrito em deslizamento lateral

Medição	Superfície Limpa [kgf]	Superfície Suja [kgf]
FadLt 1	15	13
FadLt 2	13	12
FadLt 3	14	12
FadLt 4	15	12,5
FadLt 5	14	11

A F_{adLt} média de cada roda é igual a 12,1 kgf para a superfície suja e de 14,2 kgf para a superfície limpa. O desvio padrão é de 0,74 kgf para a superfície suja e de 0,84 kgf para a superfície limpa.

Conclui-se que os valores da força de atrito longitudinal e lateral são semelhantes.

3.7.3 Momento de tombamento da roda (Mtr)

3.7.3.1 Objetivo: Mtr

O objetivo deste teste é definir o momento necessário para tombar a roda. Esse momento será utilizado para calcular o peso máximo admitido para o robô sem que ocorra o tombamento em paredes verticais.

3.7.3.2 Ferramentas e equipamentos utilizados: *Mtr*

- a) Uma balança digital com resolução de 0,1kgf e capacidade de 50 kgf.

3.7.3.3 Componentes utilizados: *Mtr*

- a) Uma roda do robô com o mancal montado;
b) Uma calota esférica.

3.7.3.4 Set-up: *Mtr*

A roda foi conectada à calota esférica. A corda foi fixada em um ponto de ancoragem de altura conhecida. A corda traciona o conjunto quando é conectada à balança, conforme Figura 25.

3.7.3.5 Método: *Mtr*

Exercendo uma força gradual na balança, leu-se o maior valor registrado antes do início do deslizamento da roda. O teste foi repetido cinco vezes.

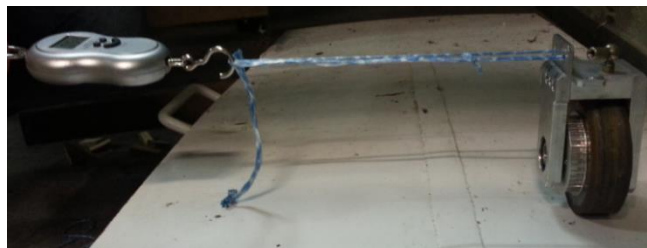


Figura 25 – Teste de momento de tombamento da roda

3.7.3.6 Cálculos: *Mtr*

Para o cálculo do momento de tombamento da roda, *Mtr* foi utilizado o valor da força de tombamento, $F_{balança}$, multiplicado pela distância vertical de 117,5mm. Conforme DCL da Figura 26, tem-se:

$$\begin{aligned}
 Mtr &= F_{balança} \times 117,5 \text{ [kgf.mm]} \\
 Mtr &= F_{balança} \times 117,5 \text{ [kgf.mm]} \times \frac{9,81[N]}{[kgf]} \times \frac{[m]}{1000[mm]} \\
 Mtr &= F_{balança} \times 1,152675 \text{ [N.m]}
 \end{aligned}$$

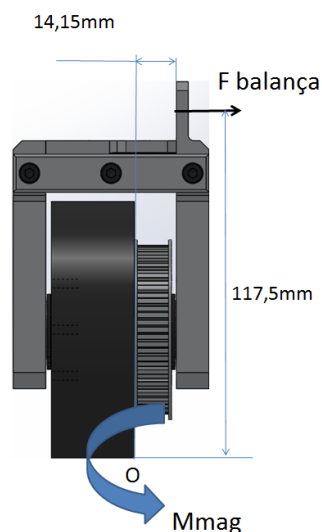


Figura 26 – DCL das forças durante deslizamento longitudinal

Assim, o momento de tombamento da roda, M_{tr} é o valor lido na balança multiplicado pelo fator de conversão 1,153.

3.7.3.7 Resultados obtidos: M_{tr}

Os resultados das medições são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Momento de tombamento da roda

Medição	Momento de Tombamento [N.m]
Mtr 1	2,06
Mtr 2	2,10
Mtr 2	2,10
Mtr 2	2,10
Mtr 2	2,10

O momento de tombamento médio de cada roda é de 2,07 N.m e o desvio padrão é de 0,02 N.m.

3.7.4 Desgaste da cobertura da roda em deslocamento retilíneo (D_{cldr})

3.7.4.1 Objetivo: D_{cldr}

Esse teste foi realizado para estimar a vida útil da cobertura da roda de primeira geração apenas em deslocamentos retilíneos. Posteriormente essa distância será utilizada para calcular quantas inspeções poderão ser realizadas com cada cobertura.

3.7.4.2 Ferramentas e equipamentos utilizados: Dcrrd

- a) Um torno mecânico;
- b) Tubo de aço ABNT 1020 com parede de 10 mm de espessura e diâmetro 180 mm.

3.7.4.3 Componentes utilizados: Dcrrd

- a) Uma roda do robô;
- b) Uma barra do perfil estrutural em alumínio;
- c) Articulações do sistema de suspensão e cambagem da primeira geração.

3.7.4.4 Set-up: Dcrrd

O tubo de aço foi fixado na castanha do torno, a roda magnética presa ao castelo simulando a conexão em uma superfície plana (Figura 27).

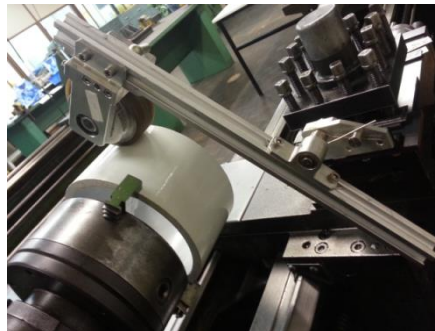


Figura 27 – Teste de desgaste da cobertura da roda em deslocamento retilíneo

3.7.4.5 Método: Dcrrd

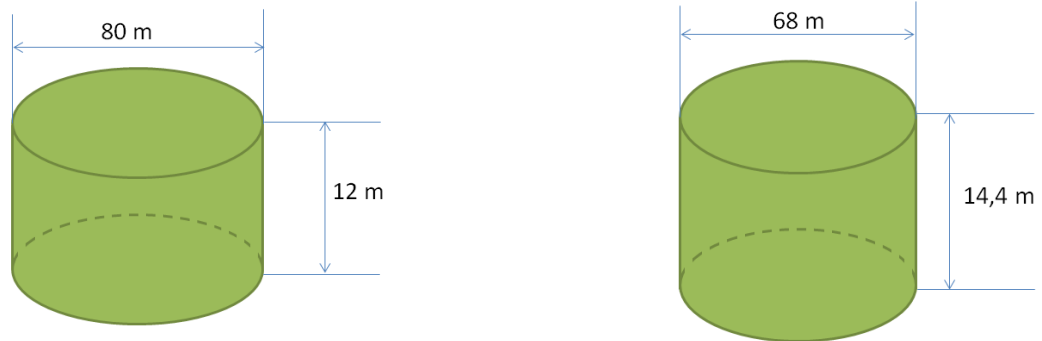
Para determinar o desgaste da cobertura da roda, foi utilizado o mecanismo da primeira geração do robô para manter a roda conectada ao tubo, normal a superfície de rolamento.

Para determinar o desgaste, houve o acompanhamento do peso e do diâmetro da cobertura, antes, durante e depois do teste.

3.7.4.6 Cálculos: Dcrrd

Os cálculos de desgaste foram baseados na distância percorrida para inspecionar a área lateral de um tanque de petróleo.

As dimensões dos tanques foram retiradas da norma ABNT NBR 7821/1983 (1983, p 85), considerando os dois tanques cilíndricos com as maiores dimensões, conforme Figura 28.



a) Tanque com 80 m de diâmetro e 12 m de altura b) Tanque com 68 m de diâmetro e 14,4 m de altura

Figura 28 – Maiores dimensões de tanques de petróleo e derivados

Área do tanque (a):

$$A_a = \pi D_a L_a$$

$$A_a = \pi \times 80 \times 12 = 3016 \text{ m}^2$$

Área do tanque (b)

$$A_b = \pi D_b L_b$$

$$A_b = \pi \times 68 \times 14,4 = 3076 \text{ m}^2$$

O tanque (b) possui área de inspeção maior que o tanque (a).

Considerando que o comprimento da régua de ultrassom seja de $L_R = 0,3 \text{ m}$, a distância retilínea total L_t percorrida pelo robô será:

$$L_t \times \frac{A_b}{L_R} = \frac{3076}{0,3} = 10.254 \text{ m}$$

O diâmetro do tubo de aço utilizado para o teste é de 180 mm. Seu perímetro P_t :

$$P_t = \pi D_t = \pi \times 0,18 = 0,565 \text{ m}$$

Ou seja, a roda do robô percorre 0,565 metros por volta que completa no tubo.

A rotação utilizada no torno foi de 250 rpm.

A cada minuto a roda percorre 141,25 m. Com isso:

$$t_t = \frac{L_t}{141,25} = \frac{10.254}{141,25} = 72,6 \text{ minutos}$$

O teste foi realizado por 90 minutos com medições de peso e diâmetro no início, a 45 minutos do início, no final do teste e no dia seguinte. A medição no dia seguinte ocorreu para verificar se a resina utilizada na cobertura da roda sofre deformação elástica ao ser comprimida durante o teste.

3.7.4.7 Resultados obtidos: Dcldr

Segue na Tabela 6 o resultado dos testes:

Tabela 6 – Resultados do teste de desgaste em deslocamento retilíneo

	<i>t = 0 min</i>	<i>t = 45 min</i>	<i>T = 90 min</i>	<i>T descanso</i>
Peso	1473,88 g	1473,87 g	1473,86 g	1473,86 g
Diâmetro	86,35 mm	86,20 mm	86,20 mm	86,35 mm

Conclui-se que o Dcldr foi insignificante durante o teste.

3.7.5 Desgaste da cobertura da roda em deslocamento em curva (Dcfdc)

3.7.5.1 Objetivo: Dcfdc

Esse teste foi realizado para estimar a vida útil da cobertura da roda apenas em deslocamentos curvilíneos. Posteriormente, o número de voltas obtido será utilizado para calcular quantas vezes o robô pode girar no próprio eixo e, conseqüentemente, estimar o número de inspeções que podem ser realizadas com a mesma cobertura.

3.7.5.2 Ferramentas e equipamentos utilizados: Dcfdc

a) Torno mecânico;

- b) Placa circular de aço ABNT 1020 com 10 mm de espessura e 380 mm de diâmetro.

3.7.5.3 Componentes utilizados: Dcrdc

- a) Uma roda do robô;
- b) Uma barra do perfil estrutural em alumínio;
- c) Articulações do sistema de suspensão e cambagem da primeira geração.

3.7.5.4 Set-up: Dcrdc

A placa de aço foi fixada na castanha do torno, a roda magnética presa ao castelo simulando a conexão da roda do robô durante as manobras em seu próprio eixo (Figura 29).



Figura 29 – Teste de desgaste da cobertura da roda em deslocamento curvilíneo

3.7.5.5 Método: Dcrdc

A roda foi posicionada a 125 mm do centro da placa para simular o movimento em curva quando o robô gira em torno do próprio eixo.

Para determinar o desgaste, houve o acompanhamento do peso da roda, antes e depois do teste.

3.7.5.6 Cálculos: Dcrdc

Os cálculos de desgaste foram baseados na distância percorrida para inspecionar a área lateral de um tanque de petróleo.

Os tanques de petróleo possuem escadas posicionadas na lateral. Essas escadas obrigam o robô a realizar manobras de 180°.

Para o cálculo de manobras que o robô irá realizar utilizou-se o tanque da ABNT NBR 7821/1983 (1983 p 65) com maior altura, conforme Figura 30:

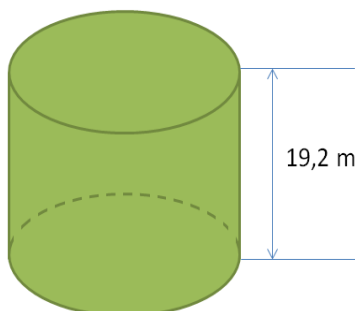


Figura 30 – Tanque com maior altura

A altura do tanque é $H = 19,2$ m.

Considerando que o comprimento da régua de ultrassom seja de $L_R = 0,3$ m, e que a cada L_R o robô precise fazer uma manobra, a cada tanque inspecionado o robô realizará 64 manobras de 180° .

Uma volta completa na placa significa duas manobras, Portanto, o teste precisa realizar 32 voltas completas no torno mecânico.

Foram realizadas 146 voltas na placa, com medições de peso no início, e no final do teste para avaliar o desgaste.

3.7.5.7 Resultados obtidos: Dcrdc

Segue na Tabela 7 o resultado dos testes:

Tabela 7 – Resultados do teste de desgaste em deslocamento curvilíneo

	<i>L = 0 voltas</i>	<i>t = 146 voltas</i>
Peso	1473,85 g	1473,84 g

Com base nos dados da Tabela 7, verifica-se que o Dcrdc foi insignificante. Portanto, conclui-se que a cobertura é suficiente para, no mínimo, a inspeção de um tanque.

3.7.6 Desgaste da cobertura da roda girando no próprio eixo (Dcrgpe)

3.7.6.1 Objetivo: Dcrgpe

Além do deslocamento retilíneo e deslocamento curvilíneo, a roda também sofre rotação no próprio eixo quando está se posicionando. O objetivo deste teste foi estimar a vida útil da cobertura da roda, apenas com esse tipo de movimento. O número de giros no próprio eixo obtido será utilizado para calcular quantas vezes o robô pode se reorientar e, conseqüentemente, estimar o número de inspeções que podem ser realizadas com a mesma cobertura.

3.7.6.2 Ferramentas e equipamentos utilizados: Dcrgpe

- a) Torno mecânico;
- b) Placa circular de aço ABNT 1020 com 10 mm de espessura e 380 mm de diâmetro.

3.7.6.3 Componentes utilizados: Dcrgpe

- a) Uma roda do robô;
- b) Uma barra do perfil estrutural em alumínio;
- c) Articulações do sistema de suspensão e cambagem da primeira geração.

3.7.6.4 Set-up: Dcrgpe

A placa de aço foi fixada na castanha do torno, a roda magnética presa ao castelo garantindo a conexão da roda no centro da placa de aço, para simular manobras da roda em seu próprio eixo Figura 31.



Figura 31 – Teste de desgaste da cobertura da roda em rotação no próprio eixo

3.7.6.5 Método: Dcrgpe

A roda foi posicionada sobre o centro da placa para simular a rotação da roda sobre o seu próprio eixo.

Para determinar o desgaste, houve o acompanhamento do peso da roda, antes e depois do teste.

3.7.6.6 Cálculos: Dcrgpe

Os cálculos de desgaste foram baseados no número de manobras necessárias para inspecionar a área lateral do tanque de petróleo.

Na seção anterior verificou-se que o robô precisa realizar 64 manobras para inspecionar o tanque de maior altura.

Para cada manobra o robô precisa realizar duas rotações de 90°, ou seja, 180° por manobra.

Uma volta completa na placa significa duas manobras. Portanto o teste demanda realizar 32 voltas completas no torno mecânico.

Foram realizadas 146 voltas na placa, com medições de peso no início e no final do teste para avaliar o desgaste.

3.7.6.7 Resultados obtidos: Dcrgpe

Tabela 8 – Resultados do teste de desgaste com rotação no seu próprio eixo

	<i>L = 0 voltas</i>	<i>t = 146 voltas</i>
Peso	1473,54 g	1473,53 g

Com base nos dados da Tabela 8, verifica-se que o Dcrgpe foi insignificante. Portanto, conclui-se que a cobertura é suficiente para, no mínimo, a inspeção de um tanque.

3.8 CONSIDERAÇÕES SOBRE A PRIMEIRA GERAÇÃO DO ROBÔ

O robô foi projetado com a maioria das suas peças em alumínio. Apresentou redução significativa da massa total em relação ao modelo desenvolvido pelo CENPES e aumentou a força de conexão das rodas magnéticas. Como resultado,

aumentou a capacidade de adesão nas paredes dos tanques. Pode-se afirmar que essas foram as principais contribuições do projeto.

3.8.1 Limitações

A utilização de correias para transmissão de tração entre as rodas contribuiu para o surgimento de problemas de locomoção ao entrar em contato com a superfície de trabalho durante a travessia de obstáculos (e.g. cordão de solda).

O sistema de suspensão e cambagem presentes são limitados e permitem a desconexão parcial das rodas ao ultrapassar obstáculos ou superfícies não planas. A separação de uma das rodas da superfície metálica significa uma redução de força de sustentação total do robô. Em condições adversas, a variação da distância entre o sensor de ultrassom e o cordão de solda pode prejudicar a coleta de dados.

O eixo de giro de cambagem distante da superfície e a dificuldade para realizar curvas transferem os esforços para a estrutura e para as fixações. Esses fatores contribuem para o aparecimento de deformações na estrutura e folgas nas fixações que são prejudiciais ao mecanismo e exigem manutenção prematura do equipamento.

4 DESENVOLVIMENTO DA SOLUÇÃO CONCEITUAL

O objetivo desta seção é apresentar o desenvolvimento das especificações do produto a partir das informações levantadas, de forma que a solução possa ser estruturada a partir das definições básicas e as restrições que cercam o projeto.

4.1 ESCOPO DO PRODUTO

A inspeção dos reservatórios de combustíveis da Petrobras é realizada através mão de obra humana direta, resultando em um processo que pode levar dias ou semanas.

Além de exigir um alto tempo de ociosidade dos tanques, a inspeção oferece risco ao inspetor que fica exposto a um ambiente agressivo e perigoso.

O produto a ser desenvolvido é o reprojeto do robô de inspeção de cordões de solda para eliminar a inspeção manual durante essas análises. Trata-se de um dispositivo móvel controlado à distância que transporta um equipamento de ultrassom para de identificar falhas na solda e nas paredes do reservatório metálico, permitindo o translado suave durante a verificação.

4.2 METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO

A estratégia de desenvolvimento utilizada é *Engineering To Order (ETO)*, também chamada de projeto de produto por encomenda, que é uma adaptação da metodologia básica indicada pela literatura (ROZENFELD *et al.*, 2006).

Para produtos que são desenvolvidos sob encomenda, acontecem algumas mudanças nas fases iniciais do processo. Este é o caso da maior parte dos bens de capital intensivo, ou seja, produtos de produção individual (*one of a kind*), como é o caso do desenvolvimento de turbinas hidrelétricas.

Nesses casos, não se desenvolve um produto para o mercado, mas sim para atender a um cliente específico. Na Tabela 9, estão listadas as diretrizes de adaptação do modelo para um produto com esta estratégia de produção (ROZENFELD *et al.*, 2006).

Tabela 9 – Modelo de desenvolvimento de produto sob-encomenda (ETO)

	Modelo do livro	Diretrizes para considerar produto ETO
Pré-desenvolvimento	Planejamento estratégico de produtos	Após segmentação do mercado e definição de estratégias mais globais, devem-se identificar oportunidades mais específicas de encomendas de produtos
	Planejamento do Projeto (inicial)	Contém somente as atividades iniciais do planejamento ao acionar o time de desenvolvimento (e/ou engenharia) para preparar uma proposta.
	Vender produto (com elaboração do orçamento técnico)	São realizadas as atividades iniciais das fases de projeto conceitual (quando o cliente não fornece as especificações do produto) e algumas do projeto detalhado, se necessário. É determinado um preço, feito um orçamento e uma proposta comercial.
	Planejamento do Projeto	As demais atividades de planejamento são realizadas após a aprovação do orçamento e entrada do pedido.
Desenvolvimento	Projeto Informacional	Só é realizado quando o cliente contratar este serviço, se ele não fornecer as especificações do produto e/ou não conhecer em detalhe o mercado e as necessidades dos clientes.
	Projeto Conceitual	As atividades complementam o que já foi realizado na atividade de venda, quando o fornecedor não dá as especificações do produto.
	Projeto Detalhado	Ocorre como indicado no modelo.
	Preparação da Produção	Ocorre como indicado no modelo, mas, se os produtos ETO forem <i>one of a kind</i> (únicos), a produção também é individual e não se devem considerar as atividades relacionadas com a produção em lotes e/ou massa.
	Lançamento do Produto	Só ocorre o lançamento do produto em um evento com o cliente (quando desejado).
Pós-desenvolvimento	Acompanhamento do produto e processo	É um acompanhamento personalizado, pois no caso de produtos únicos não existem os processos de negócio mais amplos de assistência técnica e atendimento ao cliente.
	Descontinuar produto	São produtos de vida longa (20 a 100 anos) e, normalmente, todas essas atividades são assumidas pelo cliente.

Fonte: Rozenfeld *et al.* (2006)

A partir da metodologia e das condições específicas deste projeto apresentadas pelos parceiros, decidiu-se pela adaptação do modelo de Rozenfeld *et al.* (2006).

As necessidades dos clientes e requisitos da qualidade foram levantadas a partir de alguns pré-requisitos do cliente final, a Petrobras, e amadurecidas durante reuniões de trabalho com a equipe de eletrônica da UTFPR ao longo do período de desenvolvimento.

É importante esclarecer que algumas modificações foram impostas durante a fase de desenvolvimento e exigiram alterações no projeto em andamento. Por outro lado, algumas indefinições, como a ausência da mesa de inspeção, exigiram versatilidade do produto.

As considerações dos projetos anteriores também foram examinadas em detalhes.

Por fim, entendendo-se como clientes, a Petrobras e o Departamento de Eletrônica e estudando as recomendações do projeto de Rovani (2013), as necessidades dos clientes foram definidas.

4.3 NECESSIDADES DOS CLIENTES

O equipamento deve possuir um sistema de detecção de descontinuidade de material metálico que será utilizado para identificar trincas, falta de fusão, impurezas ou porosidade do material soldado e das paredes dos tanques. Após a leitura, as informações devem ser processadas, armazenadas ou transmitidas de modo que os dados da inspeção possam ser avaliados posteriormente.

Para desempenhar a função de inspeção, foi solicitado o desenvolvimento do projeto de um robô capaz de transitar em tanques de material ferromagnético e geometria esférica ou cilíndrica, nas posições verticais e sobre cabeça. Na lista a seguir, têm-se as necessidades dos clientes:

- a) Seja capaz de transportar um equipamento de ultrassom;
- b) Transitar na horizontal, vertical, e sobre cabeça, em tanques metálicos cilíndricos e esféricos;
- c) Manter-se conectado a superfície em todas as posições citadas;
- d) Pares de rodas desalinhadas;
- e) Rodas que não degradem a superfície de rolagem;
- f) Trânsito pela superfície sem se desconectar da mesma ao ultrapassar obstáculos;
- g) Realizar manobras pré-programadas;
- h) Todas as rodas direcionais;
- i) Motores em todas as rodas;
- j) Mudança de direção do robô com o mínimo de escorregamento das rodas;
- k) Fixação e sustentação dos componentes eletrônicos já especificados;

- l) Motores orientados para dentro do robô;
- m) Articulação para o sensor de distância;
- n) Suporte para o sensor laser.

4.4 ESPECIFICAÇÕES DO PRODUTO

A partir das necessidades dos clientes citadas na seção anterior, obtiveram-se as especificações do produto, conforme descritas abaixo.

- a) Existência de uma interface para fixar o equipamento de ultrassom;
- b) Espaço livre disponível para fixação do equipamento de ultrassom;
- c) Número de inspeções para cada cobertura da roda maior que um;
- d) Transito em posições normal, vertical, horizontal e sobre cabeça;
- e) Trânsito em geometrias planas, cilíndrica e esférica;
- f) Ultrapassar obstáculos com altura mínima de 5 mm;
- g) Número de rodas magnéticas maior ou igual quatro;
- h) Número de rodas com tração independente maior ou igual a quatro;
- i) Número de rodas direcionais maior que dois;
- j) Número de rodas sem cobertura igual a zero;
- k) Peso total do robô menor que 15,2 kgf;
- l) Existência de interface para fixação do sensor de distância;
- m) Ângulo de articulação do sensor de distância maior que 90°;
- n) Existência de uma interface para fixação do sensor laser;
- o) Número de posições fixas para o sensor laser maior que três;
- p) Orientação dos motores de tração para baixo do robô;

4.5 DESENVOLVIMENTO DO ROBÔ

Durante a fase de projeto foram avaliadas várias topologias para o robô de inspeção.

4.5.1 Sistema de direção

Desde o início do projeto, assumiu-se a necessidade de atender o princípio de Ackerman para evitar o deslizamento das rodas.

Para atender a esse princípio, independente da topologia, pelo menos uma roda direcional faz-se necessária. Para topologia utilizando quatro rodas são necessárias, no mínimo, duas rodas direcionais.

4.5.2 Sistema de tração

O sistema de tração foi definido a partir das peças já selecionadas pelo Departamento de Eletrônica, listadas no APENDICE A.

Motores menores foram adotados para compensar o torque menor de cada motor. Foi utilizado um motor para cada roda e as correias para transmissão da tração foram ser eliminadas.

Inicialmente, o projeto foi concebido com os motores das rodas laterais orientados pra fora. Observou-se que o espaço utilizado pelo robô poderia dificultar certas manobras e diminuir a área de inspeção útil.

Em reunião com o Departamento de Eletrônica decidiu-se por orientá-los para baixo do robô. Porém, como o robô estava sendo desenvolvido para ter centro de massa o mais baixo possível, a reorientação dos motores para baixo ainda não era possível. Nesse momento era estudada uma solução para permitir a instalação do dispositivo de inspeção por ultrassom, que ainda não havia sido selecionado. A solução encontrada foi elevar o chassi e tornar sua altura também regulável. Com essa solução torna-se fácil adaptar o dispositivo de ultrassom e permitiu a reorientação dos motores para o interior do robô.

4.5.3 Sistema de conexão

O princípio de conexão da primeira geração não foi alterado. O robô da segunda geração se conectará aos tanques através de força magnética, oriunda de imas permanentes a fim de garantir conexão em caso de falta de energia.

Para validação das rodas assumiu-se a topologia com quatro rodas em formato de losango (Figura 32).

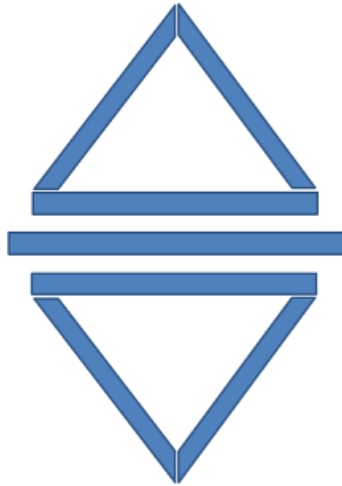


Figura 32 – Formato da topologia para validação das rodas.

Para os cálculos foram consideradas algumas situações de utilização extremas. Parâmetros como centro de massa e o coeficiente de segurança foram fixados de forma conservadora para encontrar o peso máximo admitido através dos cálculos.

a) Deslizamento do robô em paredes verticais

Para calcular o peso máximo para a segunda geração do robô relativo ao deslizamento em paredes verticais, será utilizada a FadL média encontrada na seção 3.7.1.

$$FadLm = 12,5 \text{ kgf}$$

A força de atrito total F_{at} , somando-se as quatro rodas é 50 kgf.

Considerando um coeficiente de segurança de 2,5, o peso máximo admitido para o robô é:

$$P_{\max} = \frac{F_{at}}{C_0} = \frac{50}{2,5} = 20 \text{ kgf}$$

b) Descolamento do robô na posição sobre cabeça

Para o descolamento sobre cabeça será utilizado um coeficiente de segurança igual a 3, pois uma queda pode significar prejuízo de toda estrutura e equipamentos embarcados.

As forças de conexão das rodas foram fornecidas por Rovani (2013), e podem ser observadas na Tabela 10.

Tabela 10 – Força de descolamento das rodas magnéticas, Rovani (2013)

<i>Roda Rovani (2013)</i>	<i>1ª Medição</i>	<i>2ª Medição</i>	<i>3ª Medição</i>	<i>Média</i>
Força de conexão	44,7 kgf	43,6 kgf	44,9 kgf	44,4 kgf

Para os cálculos, será considerada a força magnética de apenas três rodas, simulando que uma das rodas já esta desconectada e que a conexão do robô ao teto será mantida apenas pelas três rodas restantes. Tem-se então que:

$$F_t = 3 \times 44,4 = 133,2 \text{ kgf}$$

Considerando o descolamento do robô do teto, o peso o máximo admitido para o robô é calculado da seguinte forma:

$$P_{\max} = \frac{F_t}{C_0} = \frac{133,2}{3} = 44,4 \text{ kgf}$$

c) Tombamento da cambagem passiva em paredes verticais

Na seção 4.6.5 f está mostrado que a cambagem escolhida é a cambagem passiva. Com essa escolha, o robô fica suscetível ao descolamento iniciado pelo tombamento das rodas.

Da seção 3.7.3, tem-se que o momento de tombamento de cada roda médio é 2,07 N.m.

O eixo de rotação da cambagem está a 18,5 mm da superfície de contato (Figura 33). Considerando o coeficiente de segurança igual a 3, tombamento da cambagem passiva, o peso máximo admitido para o robô é calculado da seguinte forma:

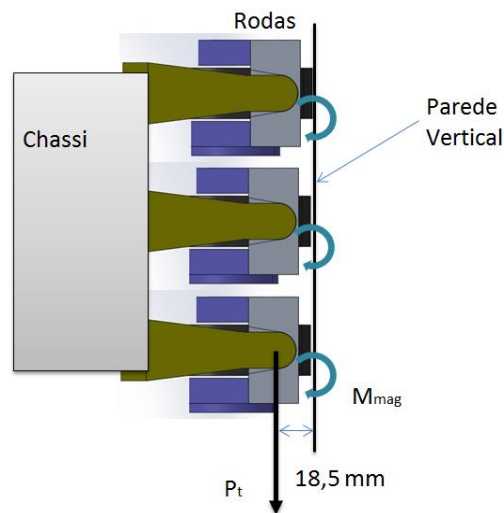


Figura 33 – DCL do momento de tombamento

$$\Sigma M = 0$$

$$4M_{tr} = C_0 P_t d$$

$$P_t = \frac{4 \times 2,07}{9,81 \times 3 \times 0,0185}$$

$$P_t = 15,2 \text{ kgf}$$

As rodas utilizadas desenvolvidas por Rovani (2013) tiveram desempenho satisfatório. A partir dos resultados obtidos foi possível afirmar que, nas condições mais severas, o modelo de rodas da primeira geração atende os requisitos de conexão do robô de segunda geração. Porém, o novo robô deve respeitar o peso total máximo de 15,2 kgf.

O desalinhamento das rodas laterais, solicitado pelo CENPES, foi mantido e aparece na segunda geração de forma ajustável. Com o formato da topologia em forma de losango, também foi criado o desalinhamento das rodas frontal e traseira. O motivo dos ajustes no alinhamento das rodas é favorecer a execução de testes para o desalinhamento.

4.5.4 Sistema de suspensão

A principal preocupação com o sistema de suspensão foi manter a mesma distância entre o chassi e o solo. No sistema Tandem, utilizado na primeira geração, esse pré-requisito era perfeitamente atendido. O princípio do sistema de suspensão

escolhido será discutido com mais detalhes durante a seção 4.5.6 porque está integralmente ligado ao desenvolvimento do chassi.

4.5.5 Sistema de cambagem

O principal requisito do sistema de cambagem é aproximar o seu eixo de rotação ao solo. Essa característica diminui o deslocamento lateral do ponto de contato da roda quando a cambagem for solicitada, e conseqüentemente reduz o escorregamento.

Observa-se que na Figura 34 (a) o deslocamento da roda com a solicitação da cambagem é muito superior ao deslocamento da roda representada pela Figura 34 (b). Como as forças de arraste são elevadas, aproximando o eixo de rotação da cambagem do solo diminui-se também a propagação de forças para o chassi.

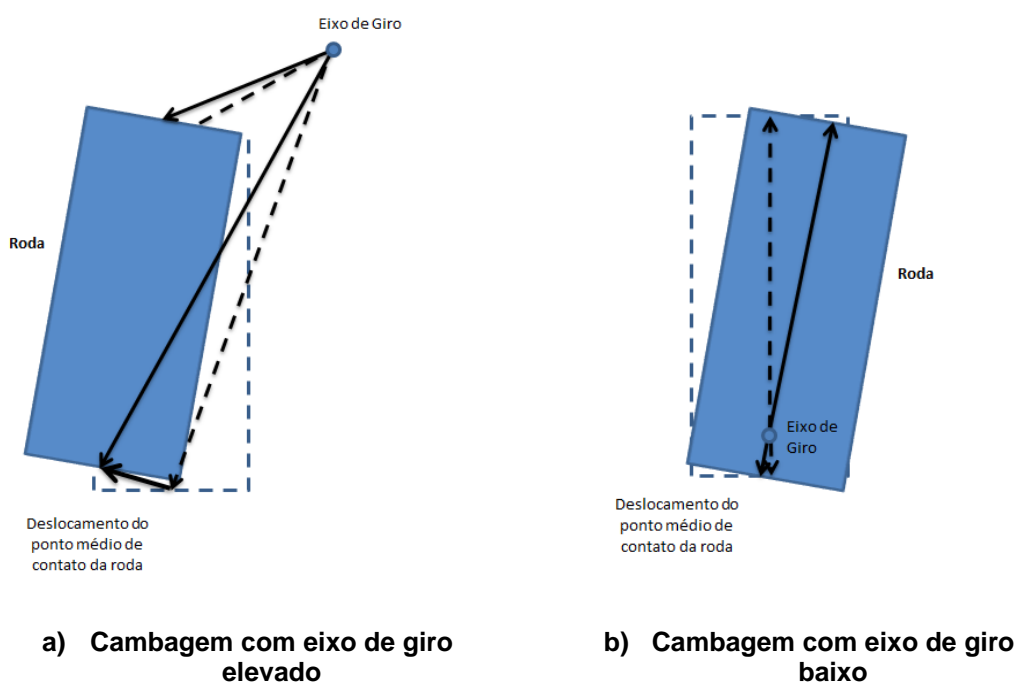


Figura 34 – Cambagem da roda em reação ao seu ponto de giro

4.5.6 Chassis

A concepção do chassi pode gerar inúmeras restrições para o desenvolvimento dos outros subsistemas. O chassi com três rodas tem algumas vantagens em relação aos demais. Além da simplicidade do conjunto, três pontos de conexão sempre mantêm o robô conectado a superfície. O raciocínio básico é que, para qualquer configuração com três pontos no espaço haverá um plano que os

contenha. Esse fator, sozinho, elimina a necessidade de um sistema de suspensão para o robô.

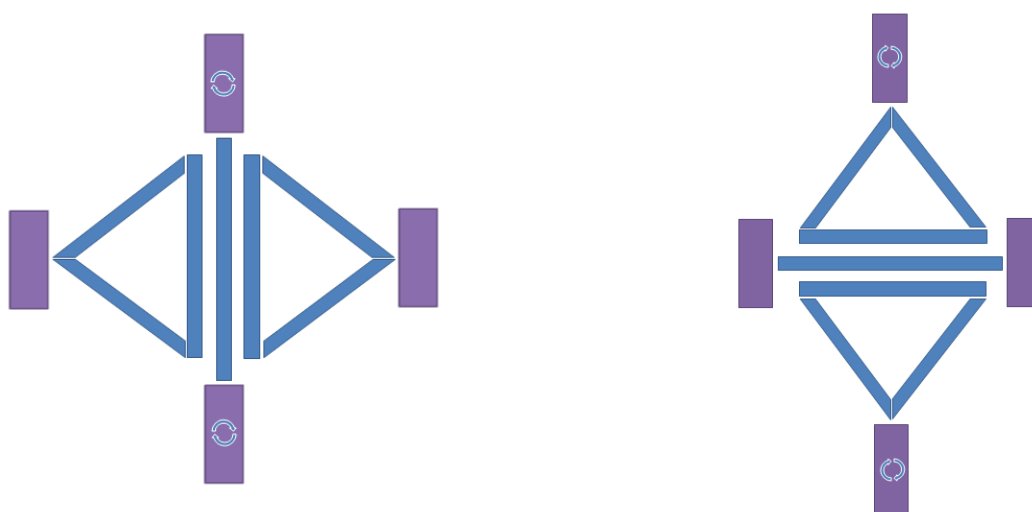
Adicionalmente, como descrito na seção 2.1.2 e 2.1.3, o uniclo e o triciclo podem ser guiados apenas com uma roda louca ou uma roda direcional, respectivamente, o que reforça a utilização de sistemas triangulares.

Porém, três pontos de conexão são insuficientes para manter o robô conectado à superfície quando estiver na posição sobre cabeça. Ao passar por obstáculos, como um cordão de solda, uma das rodas tem a sua força magnética reduzida. Essa redução momentânea da força de atração pode gerar a desconexão desta roda e, conseqüentemente, a desconexão total do robô.

Conclui-se que um chassi com um mínimo de quatro rodas deve ser escolhido para atender a força mínima de conexão.

Para atender à topologia de quatro rodas e três pontos de contato para cada plano definido, definiu-se uma estrutura em formato de losango bipartida e articulada formando dois triângulos e um retângulo central. Mantiveram-se dois planos de contato formados por três pontos e eliminou-se a necessidade de um sistema de suspensão específico.

Duas opções de chassi em formato de losango articulado podem ser observadas na Figura 35.



a) Articulação transversal ao movimento

b) Articulação longitudinal ao movimento

Figura 35 – Formatos de losango articulado

Os chassis mostrados na Figura 35 (a) e (b) possuem articulação lateral e longitudinal, respectivamente. Ambos permitem articulações solicitadas pelas rodas laterais, frontal ou traseira, separadamente ou simultaneamente. O sistema de cambagem passiva atua em conjunto com as articulações, ajustando-se para garantir o melhor contato, deixando a roda sempre normal à superfície de apoio.

Porém, fazendo-se uma análise de todo o conjunto, conclui-se que o chassi mostrado na Figura 35 (b) é superior ao chassi mostrado na Figura 35 (a). A régua inspeção, apesar de ainda não definida, deverá ser posicionada transversalmente ao movimento do robô para que se mantenha a uma distância uniforme da superfície. O chassi transversal dificulta a instalação da régua, devido a sua articulação lateral. O chassi longitudinal permite a sua instalação na parte dianteira, traseira e no eixo central.

Ao longo do projeto, definiu-se pelo Departamento de Eletrônica a preferência por quatro rodas direcionais. Desta forma, as configurações transversal e longitudinal podem ser adquiridas apenas com a orientação das rodas. De qualquer modo, o movimento do robô durante a inspeção deve ser com as rodas orientadas conforme a Figura 35 (b).

4.6 LAYOUT FINAL

A configuração final da segunda geração do robô para inspeção de tanques de petróleo foi determinada com base nas soluções para os problemas apresentados pela primeira geração e levantamento das necessidades dos clientes.

4.6.1 Sistema de direção

O sistema de direção escolhido foi o direcionamento independente para cada roda. Duas rodas direcionais são suficientes para que a topologia de quatro rodas em losango respeite a condição de Ackerman. Porém, o Departamento de Eletrônica exigiu a presença de quatro rodas direcionais para tornar a movimentação mais dinâmica e facilitar a utilização dos sensores de varredura e posicionamento. Adicionalmente, o robô teve seu projeto padronizado ao utilizar a mesma arquitetura de rodas para as quatro posições. O *layout* do sistema de direção pode ser visto na Figura 36.

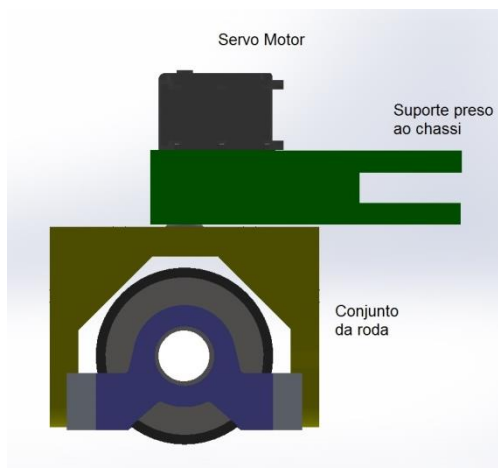


Figura 36 – Ilustração do sistema de direcionamento acionado por servo motor

4.6.2 Sistema de tração

A eliminação das correias exigiu um sistema de tração independente para cada roda. O conjunto da roda é conectado diretamente ao conjunto motor-redutor (Figura 37).

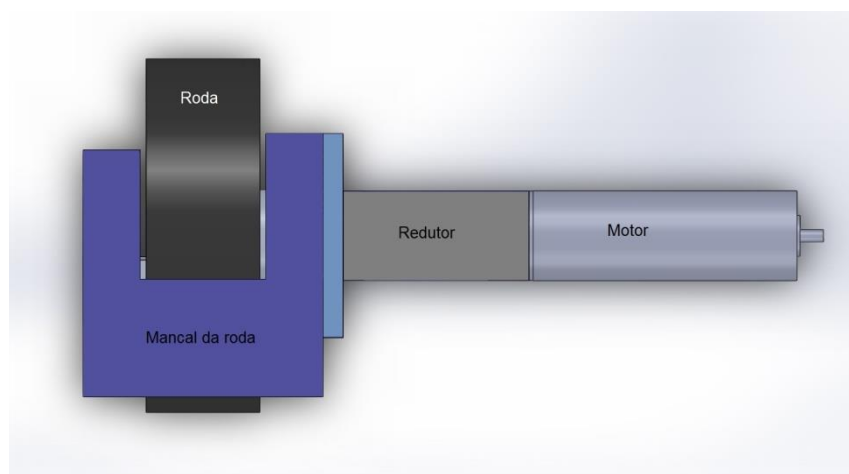


Figura 37 – Ilustração do sistema de tração

4.6.3 Sistema de conexão

O sistema de conexão são as rodas desenvolvidas por Rovani (2013).

4.6.4 Sistema de suspensão

O sistema de suspensão são as articulações do chassi em losango bipartido articulado com auxílio da cambagem passiva (Figura 34).

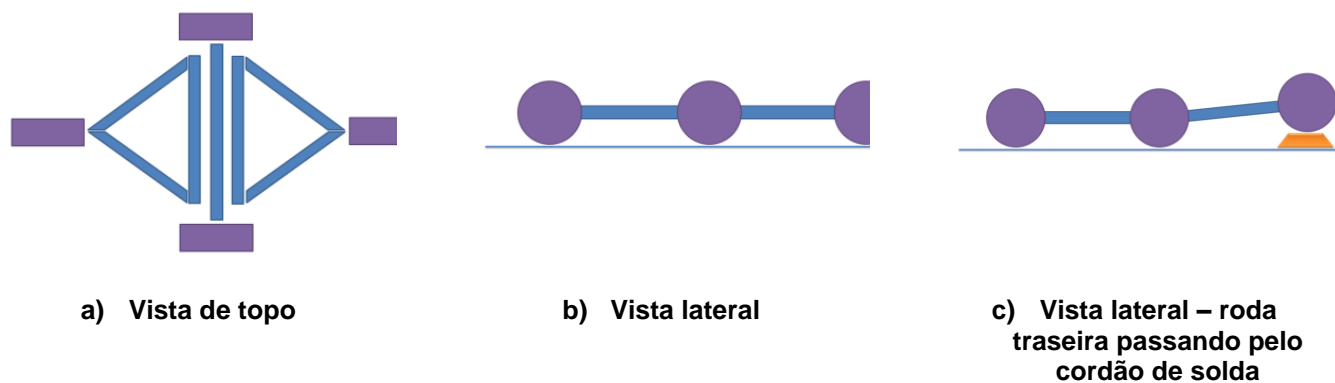


Figura 38 – Chassi e o sistema de suspensão

A Figura 38 (a) mostra o *layout* do robô na vista de topo. A figura (b) mostra a vista lateral do *layout* do chassi. A Figura 38 (c) mostra o movimento do chassi durante a passagem da última roda por um obstáculo (e.g. cordão de solda).

4.6.5 Sistema de cambagem

Optou-se pela cambagem com eixo de giro da roda o mais próximo possível da superfície de rolagem para reduzir o deslocamento lateral durante as manobras, ao invés de fazer um mecanismo para tombar a roda, conforme Figura 34 (b).

Na Figura 39 está ilustrado o conceito de cambagem definido para o robô de segunda geração.

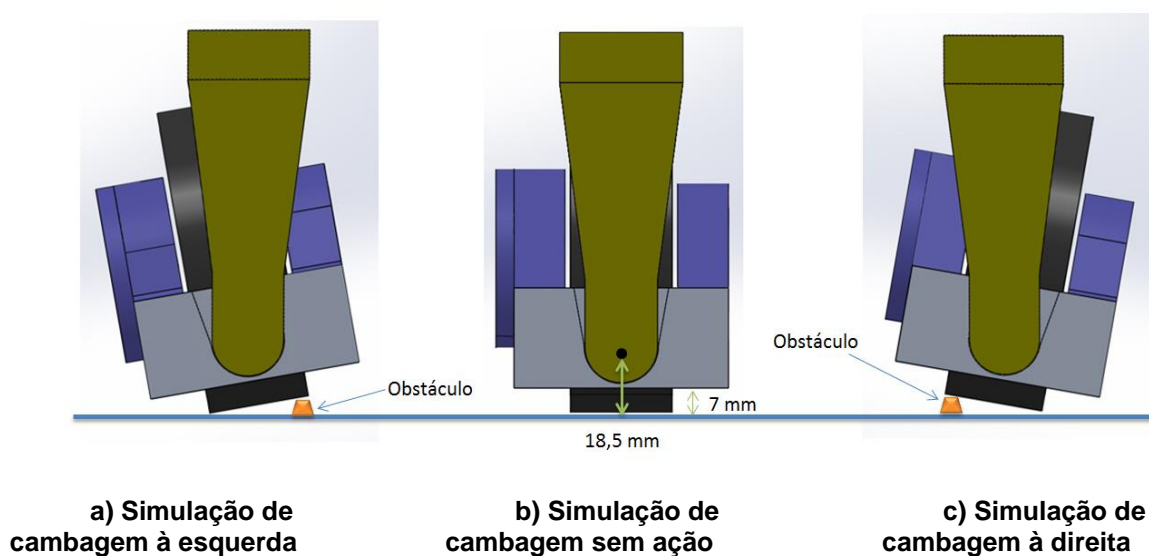


Figura 39 – Ilustração da cambagem do robô da segunda geração

4.6.6 Chassis

Adoção do princípio de que três pontos definem um plano foi um conceito utilizado para definir a topologia.

Com a decisão de utilizar a roda desenvolvida por robô Rovani (2013) e quatro rodas com tração individual, conforme discutido na seção 4.5.3, optou-se pela utilização do chassi em formato de losango articulado em uma das diagonais formando dois triângulos, garantindo, assim, a conexão das quatro rodas em qualquer superfície curva (Figura 40).

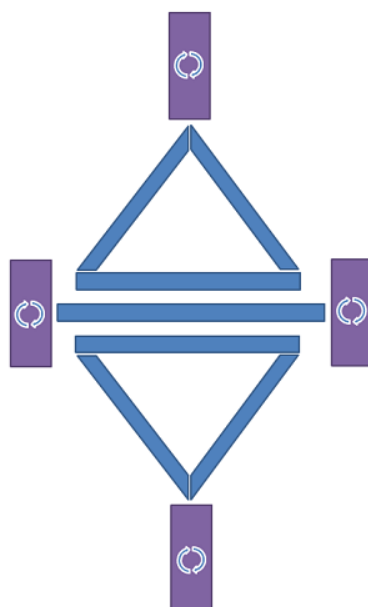


Figura 40 – Topologia final da segunda geração do robô

O formato de losango bipartido com articulação longitudinal também desempenha a função de suspensão do sistema e garante o chassi sempre a mesma distância do solo.

A utilização de molas e amortecedores no sistema de suspensão, associado ao chassi, foi descartada porque o ponto de equilíbrio é dado sempre pelo contato da roda com a superfície.

5 PROJETO PRELIMINAR

No início do capítulo 2, definiu-se uma nomenclatura baseada em seis subsistemas principais, julgados básicos para o funcionamento do robô. O método foi fundamental pra que o conteúdo fosse estruturado de forma organizada, facilitando a sua construção e o seu entendimento.

Entretanto, cada vez mais o robô se aproxima do seu formato final. Neste capítulo, os conceitos pesquisados serão transformados em um produto e surge a necessidade de explorar os seus subconjuntos. A partir de agora, utilizar-se á a nomenclatura baseada nos seus quatro subconjuntos. São eles:

1. Chassi;
2. Conjunto de locomoção;
3. Conjunto sensor de distância;
4. Conjunto sensor laser.

Na Figura 41 é ilustrada, através de conjuntos, a participação de cada subconjunto na realização das funções executadas pelos subsistemas.

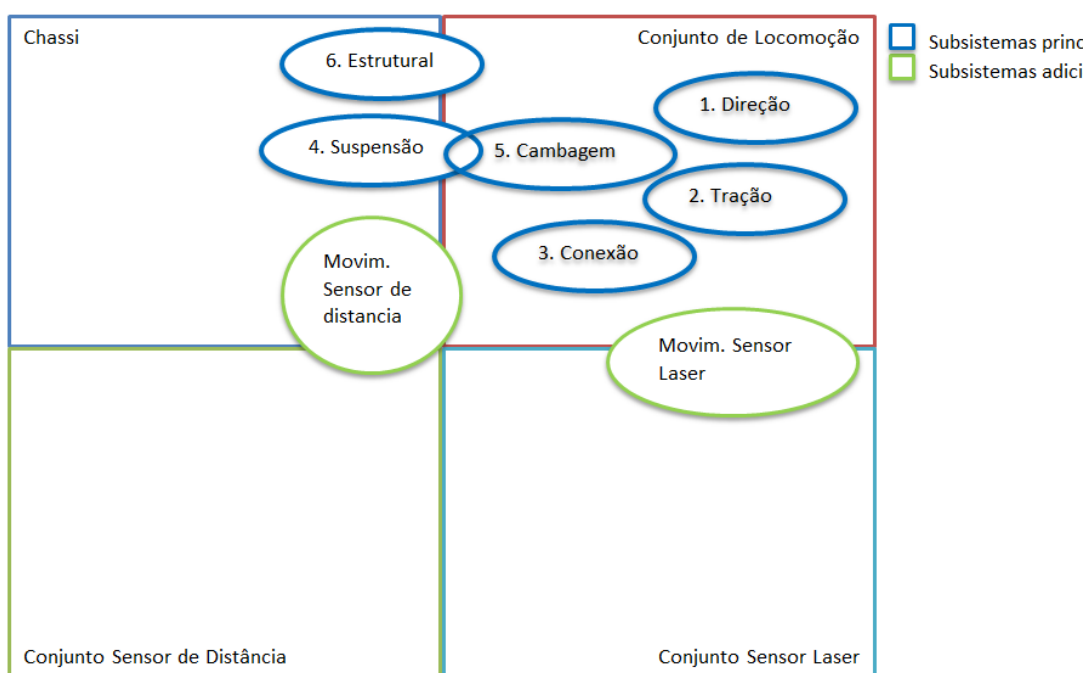


Figura 41 – Relação dos subconjuntos e subsistemas

Os sistemas de direção, tração, conexão e cambagem são realizados apenas pelo conjunto de locomoção. Os demais sistemas compartilham seu funcionamento com os demais subconjuntos. O sistema adicional que posiciona o sensor de distância é executado pelo chassi, conjunto de locomoção e pelo próprio conjunto do sensor de distância. O sistema estrutural, sensor laser e o sistema de suspensão também suspensão utilizam o conjunto de locomoção para seu funcionamento.

O conjunto de locomoção é o grupo mais complexo, pela quantidade de subsistemas. É, também, o conjunto que agrupa maior quantidade de componentes.

Ao todo, foram projetados trinta e nove elementos diferentes. Para facilitar a condução do projeto, criou-se uma sistemática para definir a nomenclatura das peças. Da mesma, forma criou-se um método para numeração das referências. Esse conjunto de nomenclatura e numeração se baseia na árvore de subconjuntos É definido da seguinte maneira:

Nomenclatura:

Nome do subconjunto – Nome do subconjunto de ordem superior – Nome do –
Nome da Peça.

Exemplo 1:

Subconjunto: Sistema de Locomoção

Subconjunto de ordem superior: Roda

Nome da peça: Bucha

Nomenclatura: Sistema de Locomoção – Roda – Bucha

Número da referência: (6 dígitos)

Número: ABCBEF

AB0000: Número relacionado ao subconjunto

ABCD00: Número relacionado ao subconjunto de ordem superior

ABCDEF: Número relacionado ao nome da peça

Exemplo 2:

Sistema de Locomoção: Subconjunto referência 120000

Roda: Subconjunto referência: 120100

Bucha: Peça referência 120102

Observações:

- a) Sempre que um número terminar em 00 trata-se de um subconjunto;
- b) Uma peça sempre terá sua referência terminando em um número diferente de 00, inclusive quando se tratar de uma nomenclatura que não utilize um subconjunto de ordem superior;
- c) Peças padronizadas e utilizadas em conjuntos diferentes foram numeradas em sequência a partir do número 900001.

A tabela de peças com nomes e referências está disponível no APENDICE B.

5.1 CHASSI

O chassi foi construído com peças comerciais padrões e com peças usinadas. Sua geometria básica, baseada no layout final apresentado na seção 4.6, pode ser observada na Figura 42.

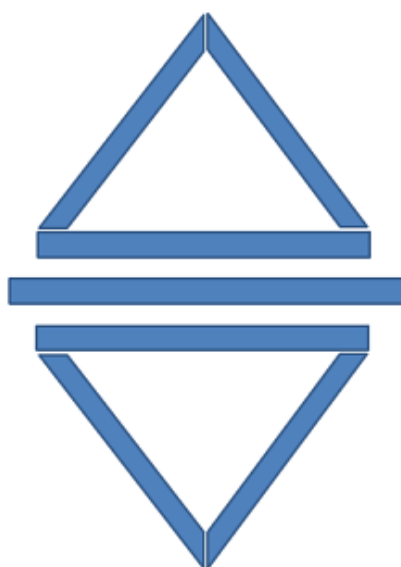


Figura 42 – Ilustração do formato do chassi

Verifica-se na Figura 42 que o conjunto do chassi, além da função estrutural, também é responsável pelo sistema de suspensão do robô.

A rigidez é dada pela utilização de perfis estruturais, e a articulação foi alcançada com a utilização de dobradiças para ligação dos dois triângulos rígidos com o perfil central. A conexão dos triângulos é realizada por peças usinadas.

5.1.1 Perfil estrutural padrão em alumínio

A elevada redução de massa, obtida no projeto da primeira geração do robô, deve ser mantida. A utilização de perfis comerciais extrudados em alumínio contribui para que esse objetivo seja atingido. Adicionalmente, esses perfis padrões facilitam as fixações e fornecem rigidez suficiente ao chassi. Baseado nesses aspectos, a segunda geração adotará, também, perfis estruturais para construção do chassi.

A escolha do perfil se baseou nos seguintes aspectos:

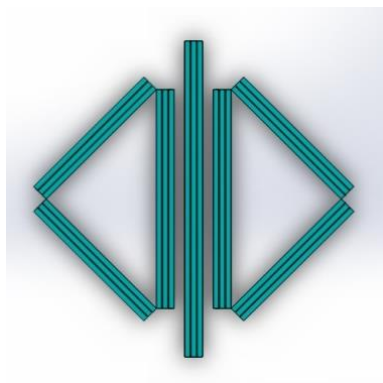
- a) Menor peso por metro de comprimento;
- b) Resistência mecânica suficiente;
- c) Possibilidade de fixação nas quatro faces;
- d) Experiência adquirida com o sucesso na utilização na primeira geração do robô.

Considerou-se que o perfil estrutural de alumínio Kanya D01-5 20x20 mm atende as necessidades (Figura 43).



Figura 43 – Perfil estrutural de alumínio, 20x20mm

Ao todo, sete peças (três peças de tamanho diferentes) do conjunto do chassi foram projetadas com perfil de alumínio Kanya D01-5 (Figura 44).



Vista de topo



Vista isométrica

Figura 44 – Chassi: Perfis Kanya

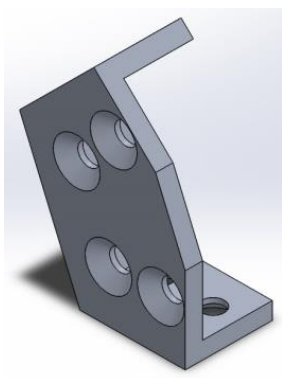
O formato do chassi permite que a distância entre rodas seja alterada quando a régua do sistema de ultrassom for definida. Esse ajuste pode ser feito com a troca destes perfis por peças proporcionalmente maiores.

5.1.2 Conexões usinadas

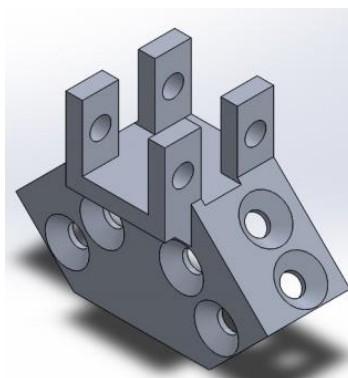
Cada triângulo do chassi é conectado por três suportes usinados. Os dois suportes que fazem o ângulo agudo são iguais e o suporte que faz o ângulo obtuso também auxiliam as conexões com os conjuntos de locomoção dianteiro e traseiro.

No perfil central, também existem dois suportes iguais que, um de cada lado, auxilia a conexão com o conjunto de locomoção. O suporte do perfil central é chamado de suporte reto.

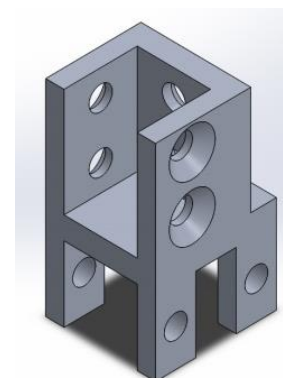
Na Figura 45 e é possível observar os três suportes usinados.



a) Suporte Agudo



b) Suporte Obtuso



c) Suporte Reto

Figura 45 – Suportes usinados do chassi

Na Figura 46 podem ser vistos os suportes montados nos perfis.

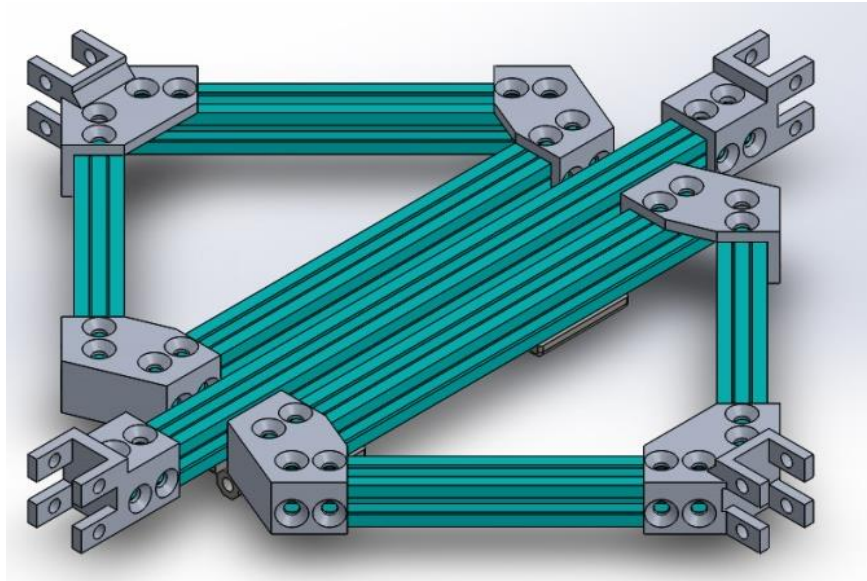


Figura 46 – Suportes montados nos perfis

5.1.3 Componentes comerciais

A definição do perfil Kanya 20x20 mm possibilita a utilização de parafusos para fixação com rosca M6 ou menor.

Devido às folgas detectadas no robô da primeira geração, que utilizava roscas M4 e M5, optou-se pela utilização das maiores roscas possíveis. Nesse caso, as roscas M6.

Para os componentes usinados em alumínio que recebem roscas, parafusos M6 também foram utilizados, com objetivo de manter o padrão. Os furos em alumínio necessitam de uma distância das arestas de, no mínimo, duas vezes o diâmetro. Nas posições onde as dimensões não permitiram, utilizaram-se parafusos menores.

O material escolhido para os fixadores é o aço inox austenítico, para evitar a corrosão e diminuir a interferência no campo magnético das rodas.

Para garantir a articulação dos triângulos com o perfil central foram utilizadas quatro dobradiças posicionadas na região inferior do chassi.

As dobradiças Kanya *Zn-diecasting* B60-20 podem ser verificadas na Figura 47.

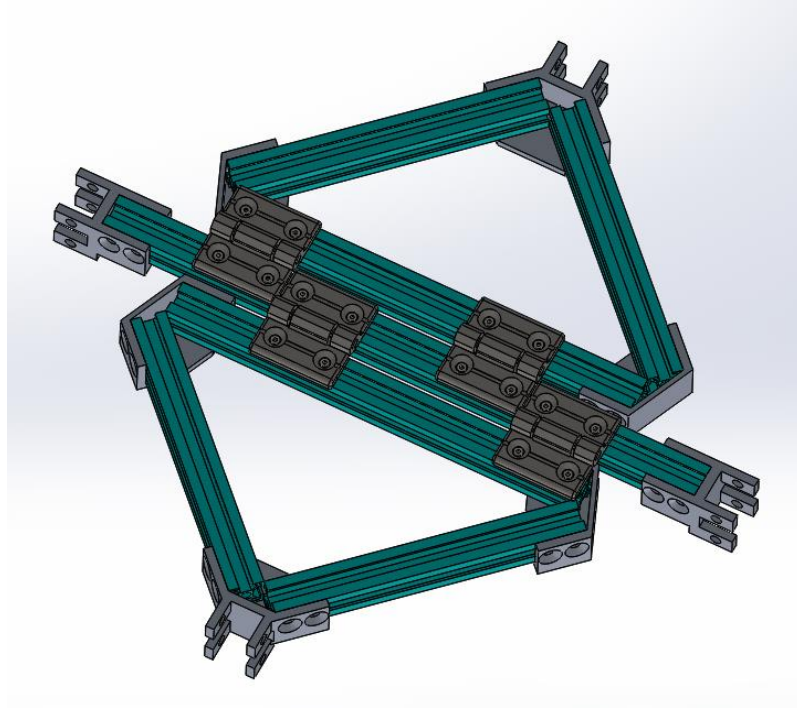


Figura 47 – Vista inferior do chassi articulado com dobradiças

5.1.4 Tamanho do chassi

O *layout* do chassi foi desenvolvido de forma que suas dimensões possam ser aumentadas ou diminuídas. A harmonia geométrica do chassi e o planejamento modular dos subconjuntos permite que o volume total do chassi seja alterado apenas modificando as dimensões dos perfis de alumínio proporcionalmente (e.g.: o tamanho total do robô pode ser aumentado ao multiplicar a dimensão dos sete perfis do chassi por dois, sem alterar a concepção das conexões e dos outros subconjuntos).

Essa necessidade foi identificada quando o projeto se iniciou e muitos componentes eletrônicos ainda não haviam sido definidos.

5.2 CONJUNTO DE LOCOMOÇÃO

O conjunto de locomoção é o mais complexo do robô. Através dele são desempenhadas várias funções, como: estrutural, suspensão, direção, tração e cambagem.

A base desse conjunto é a roda desenvolvida por Rovani (2013), que segue inalterada da primeira para a segunda geração.

5.2.1 Roda

A roda atende a todos os pré-requisitos, conforme testes realizados no capítulo 3. A roda desenvolvida por Rovani (2013) pode ser vista na Figura 48.

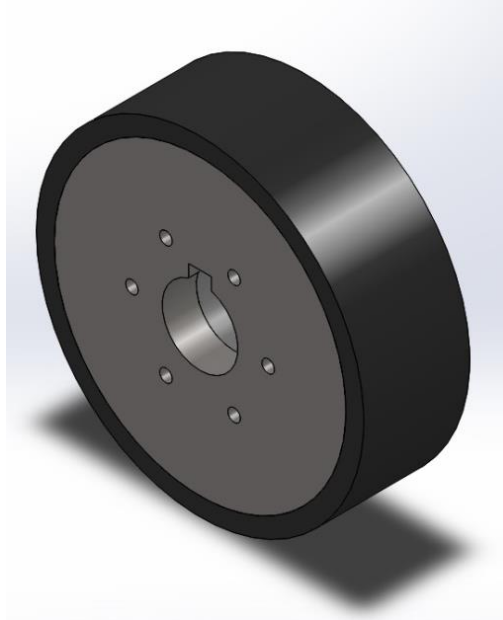


Figura 48 – Roda desenvolvida por Rovani (2013).

5.2.2 Mancal da roda

O mancal da roda foi projetado para manter o eixo de cambagem o mais próximo possível do solo.

A distância da face inferior do mancal ao solo deve respeitar uma distância mínima para evitar contato do mancal com a superfície de inspeção durante o tráfego. Da norma ABNT NBR 7821/1983, tem-se que o reforço do cordão de solda pode atingir até 3 mm acima da superfície para o tipo de chapa mais espesso. Considerou-se que uma distância de 7 mm de distância do solo é suficientes para evitar colisões com os cordões (Figura 49).

A definição da altura do ponto de giro da cambagem depende também do tamanho do rolamento. O rolamento que atendeu os esforços radiais do peso do robô e da força de conexão da roda foi de diâmetro 16 mm. Considerando a espessura da borda do mancal e as folgas para rotação do garfo, obteve-se a distância uma altura de giro de cambagem mínima de 18,5 mm.

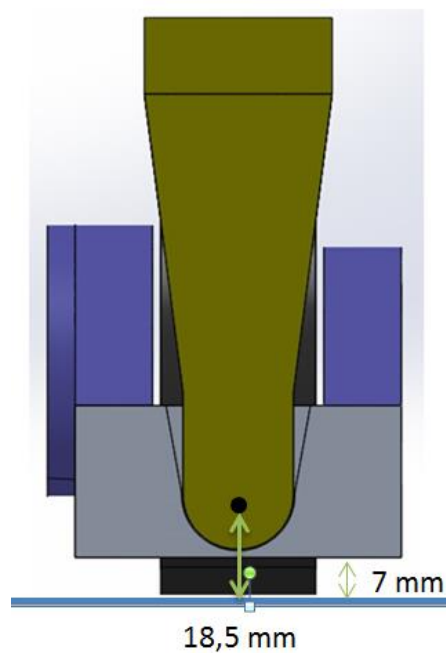


Figura 49 – Distâncias funcionais do mancal de cambagem

A modelagem do conjunto mancal da cambagem e flange que fixa o conjunto motor-reductor pode ser vista na Figura 50.

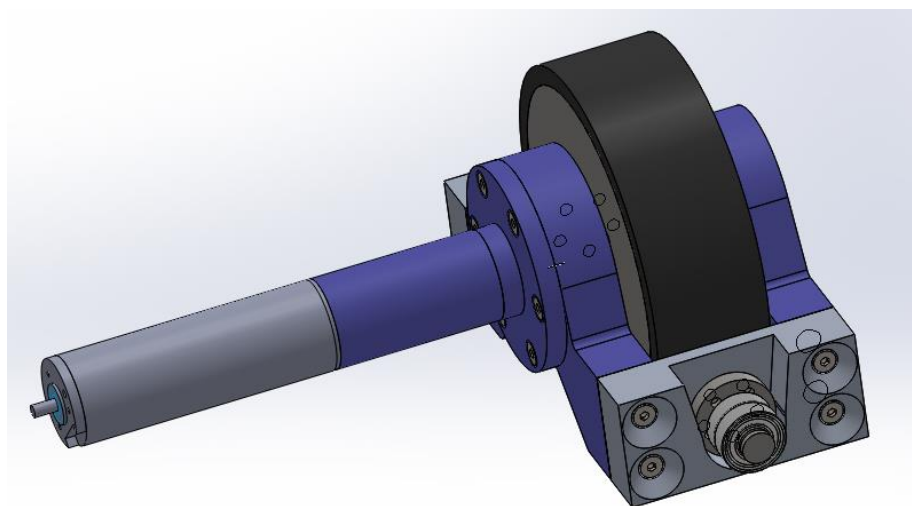


Figura 50 – Mancal da roda

5.2.3 Garfo de cambagem

O garfo de cambagem gira em torno do seu eixo de cambagem a 18,5 mm do solo. O ângulo de rotação foi limitado pelas cavidades usinadas no mancal.

O limite do ângulo de cambagem deve existir para evitar o contato do motor com o solo. Considerando a altura mínima de 7 mm, o ângulo máximo de cambagem é de $10,8^\circ$. Admite-se, assim, o ângulo máximo de cambagem para modelagem igual a 10° .

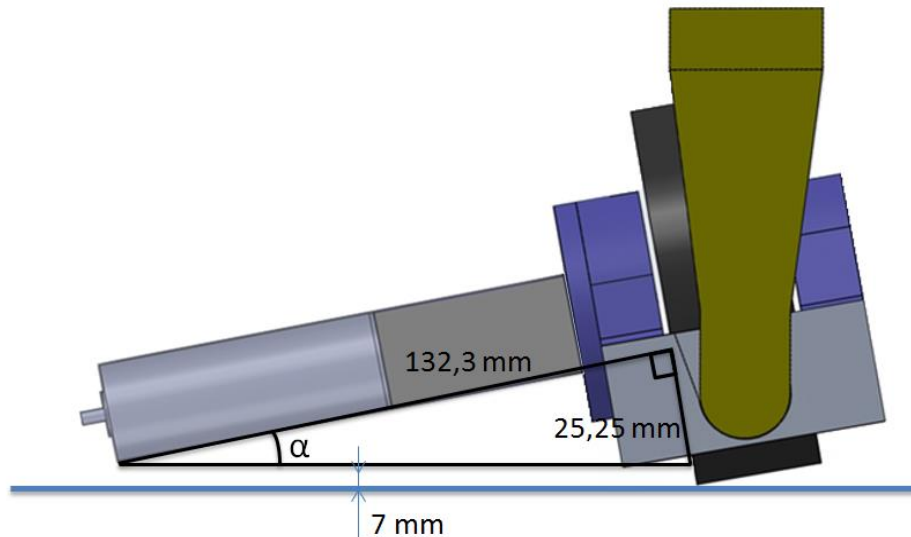


Figura 51 – Ângulo máximo de cambagem

$$\alpha = \text{arc tg} \left(\frac{25,25}{132,3} \right) = 10,8^\circ$$

Com esse valor de cambagem e as dimensões, assegura-se que o robô se acomoda em superfícies com curvatura menor que os menores reservatórios de petróleo ditados pela norma.

A cambagem permite que o robô transite em superfícies cilíndricas e esféricas com valor mínimo de raio de 2090 mm.

5.2.4 Mecanismo de direção e regulagem de altura

O mecanismo de direção das rodas é realizado pelo servo-motor acoplado em um suporte, na parte superior do garfo da cambagem. O eixo do servo-motor transmite o torque diretamente ao garfo da cambagem que conecta ao suporte do servo, fixo, por meio de rolamentos. O suporte fixo é ligado ao chassi através de dois perfis de regulagem, um de altura do chassi e outro de desalinhamento das rodas, completando o conjunto de locomoção.

Na Figura 52, é possível observar a modelagem do conjunto de locomoção.

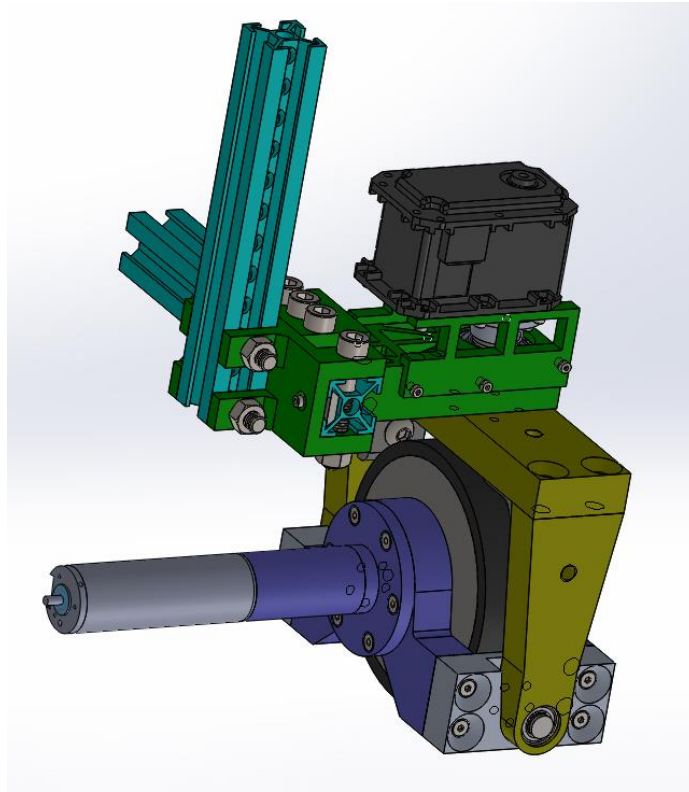


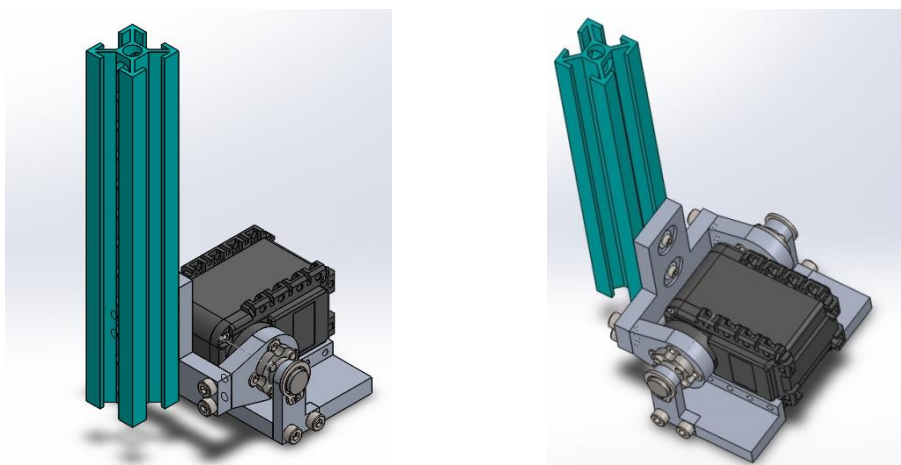
Figura 52 – Conjunto de locomoção

5.3 CONJUNTO DO SENSOR DE DISTÂNCIA

O sensor de distância faz a leitura da distância entre alguns pontos do ambiente para identificar em qual geometria de tanque ele está inspecionando.

Para fazer a leitura destes pontos, o sensor precisa de movimentação na parte superior do robô. Para executar essa movimentação foi desenvolvido um suporte articulado e acionado por um servo motor.

Na Figura 53 tem-se a modelagem do suporte do sensor de distância.



a) Vista isométrica frontal

b) Vista traseira

Figura 53 – Conjunto do sensor de distância

5.4 CONJUNTO DO SENSOR LASER

O sensor laser será posicionado na parte frontal do robô para executar a varredura 270° do ambiente. Esse sensor é fixo no perfil de regulação e não necessita de articulação durante a inspeção. Porém, existem três posições de regulação: 0° , 45° e 90° .

Na Figura 54 modelagem do suporte do sensor laser.

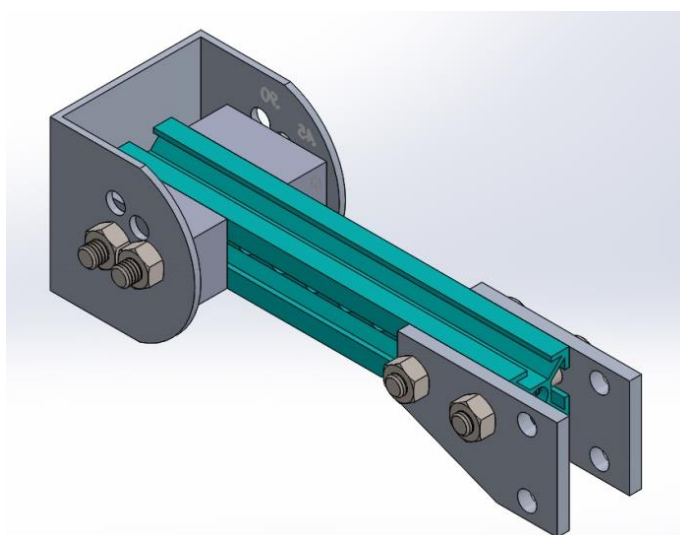


Figura 54 – Conjunto do sensor laser

5.5 MONTAGEM FINAL

O *Layout* final do robô de segunda geração é construído unindo-se os quatro subconjuntos: i/ chassi; ii/ quatro conjuntos de locomoção; iii/ um conjunto do sensor laser e iv/ um conjunto do sensor de distância.

A montagem dos quatro subconjuntos resulta no produto final, mostrado na Figura 55.

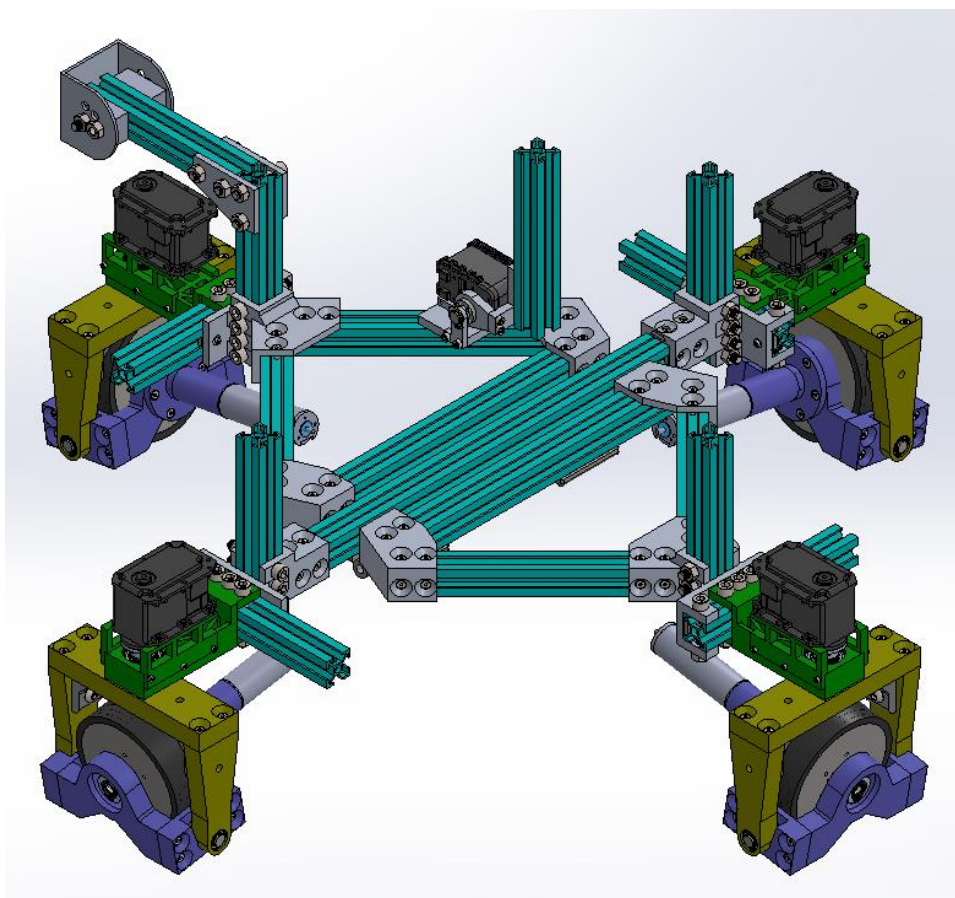


Figura 55 – Montagem final.

O peso total do robô modelado no Solid Works é de 12,5 kgf, incluído os componentes eletrônicos já definidos e atende ao peso máximo admitido de 15,2 kgf.

Na Figura 56, são apresentadas as dimensões gerais do robô de segunda geração.

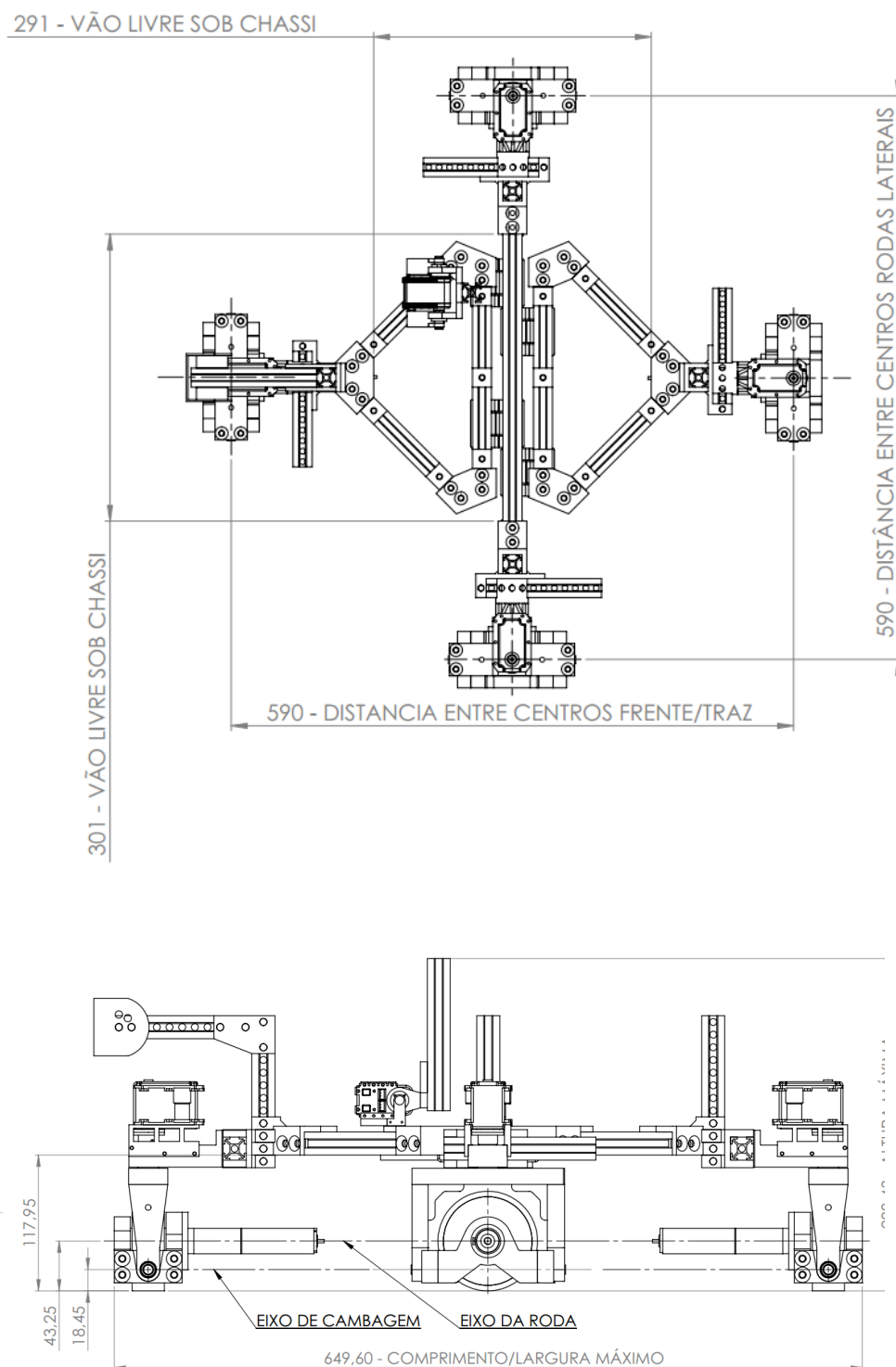


Figura 56 – Dimensões gerais do robô de segunda geração

Todas as peças usinadas possuem desenho de fabricação 2D. Na Figura 57 é apresentado um exemplo de desenho 2D.

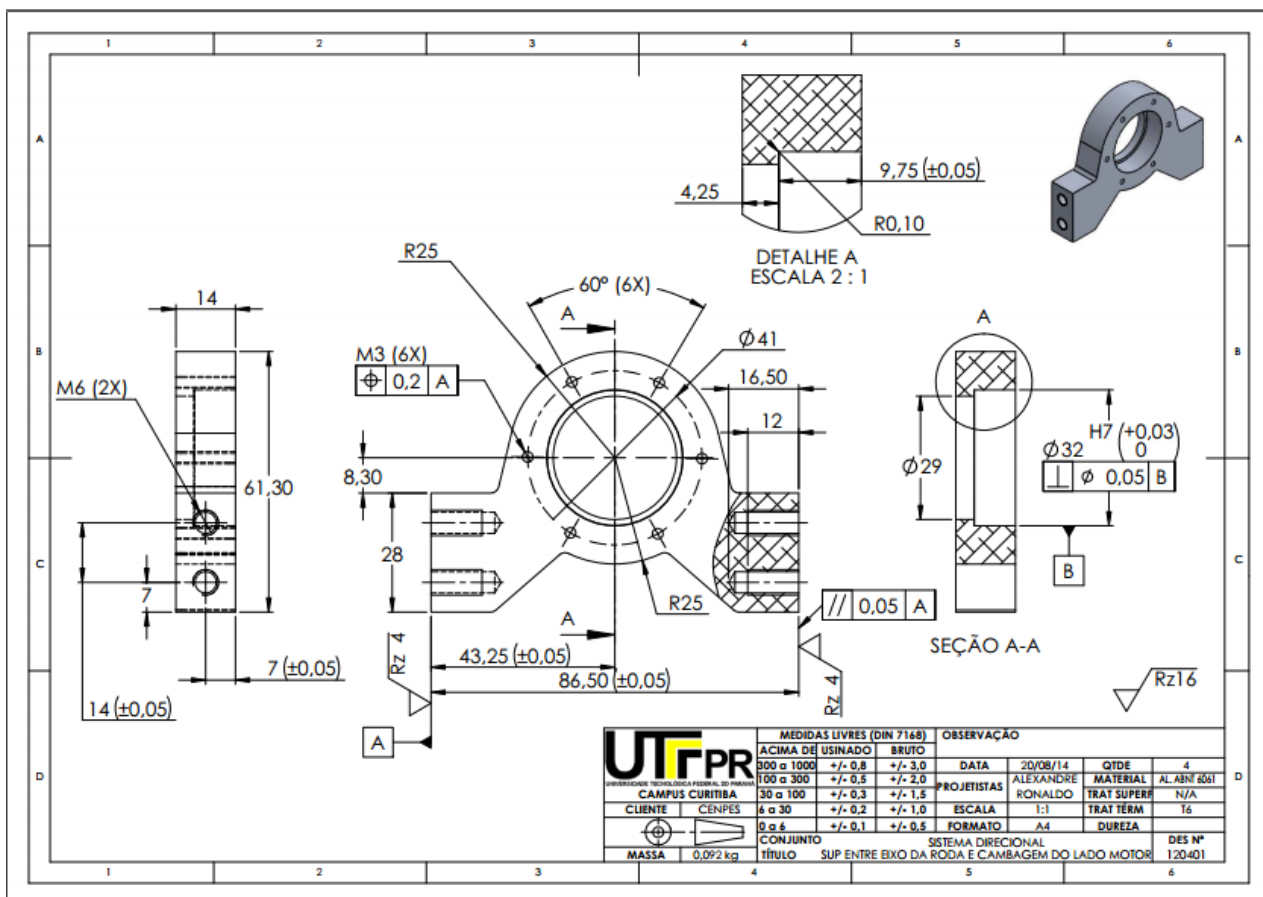


Figura 57 – Exemplo de desenho de fabricação 2D

5.6 ORIENTAÇÕES SOBRE A UTILIZAÇÃO DO ROBÔ

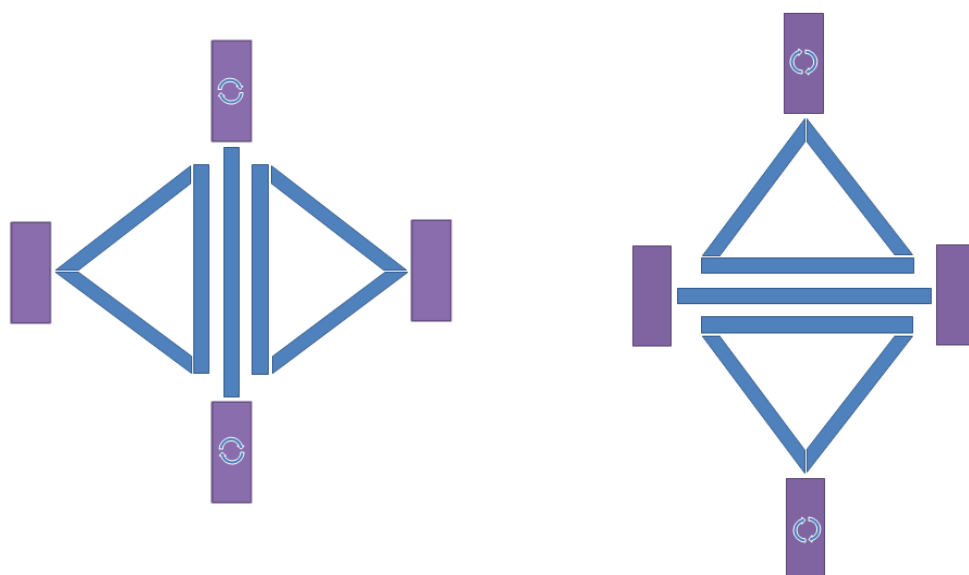
Durante o desenvolvimento identificou-se algumas particularidades que restringem a utilização do robô.

Ao escolher o *layout* do chassi, discutido na seção 4.6.6, determinou-se que a régua de inspeção deve ser instalada em uma região não articulada do chassi e que essa é a única diferença entre as duas geometrias apresentadas (Figura 58).

A partir desse princípio optou-se pela geometria de losango bipartido com articulação longitudinal ao movimento. Conclui-se então que, durante o momento de inspeção, o robô deve obedecer a uma direção de movimento.

Adicionalmente à régua de ultrassom, o sensor de distância deve se projetar para frente do robô durante a captura de dados. O posicionamento do sensor de distância foi definido em uma das barras que fazem a regulagem de altura. Define-se então que o sensor de distância deve ser instalado no suporte obtuso de um dos

triângulos e que a região em for instalado, deve ser considerada como sendo a frente do robô.



a) Articulação transversal ao movimento

b) Articulação longitudinal ao movimento

Figura 58 – Formatos dos losangos bipartidos articulados

Durante a realização de manobras ou deslocamento sem inspeção, não há qualquer restrição quanto à orientação ou direção do movimento.

5.7 CONSIDERAÇÕES SOBRE O LAYOUT FINAL

Nesta seção, o robô de segunda geração será avaliado conforme as necessidades dos clientes descritas na seção 4.3.

- a) Seja capaz de transportar um equipamento de ultrassom.

O equipamento de ultrassom não foi definido até o momento da conclusão deste trabalho. Para permitir que o equipamento seja instalado, concebeu-se o chassi com regulagem de altura.

Quando o equipamento de inspeção estiver escolhido, será necessário desenvolver um dispositivo para fazer a interface com o chassi.

- b) Transitar na horizontal, vertical, e sobre cabeça, em tanques metálicos cilíndricos e esféricos.

A articulação do chassi, associada ao sistema de cambagem, permite a acomodação do robô em superfícies planas, cilíndricas e esféricas. O chassi apresenta o mesmo comportamento nas posições normais, verticais, horizontais e sobre cabeça.

O sistema de direção fornece manobrabilidade suficiente para se reorientar em espaços pequenos ao exercer o giro sobre o seu próprio centro geométrico.

Considerando o limite do ângulo de cambagem igual a 10° , foi simulada cada condição de acoplamento e determinado o raio mínimo de cada superfície, cilíndrica ou esférica, que o robô é capaz de se acomodar. Essa análise pode ser verificada no APENDICE C.

- c) Manter-se conectado a superfície em todas as posições citadas.

A roda magnética desenvolvida por Rovani (2013), utilizada no robô de segunda geração, permite conexão segura para o robô de segunda geração.

A topologia em losango bipartido e articulado com quatro rodas direcionais, auxiliadas pela cambagem, garante que a conexão das rodas será sempre normal à superfície, seja ela plana, cilíndrica ou esférica, garantindo a força magnética de conexão máxima.

- d) Rodas desalinhadas.

O desalinhamento das rodas foi uma exigência do CENPES e também esteve presente no robô de primeira geração.

No robô de segunda geração esse desalinhamento é ajustável. O conjunto de locomoção foi desenvolvido com posições de ajustes discretas que permitem desde a condição de alinhamento pleno, até nove níveis (dez posições) de desalinhamentos das rodas laterais, dianteira e traseira. As regulagens podem ser vistas na Figura 59.

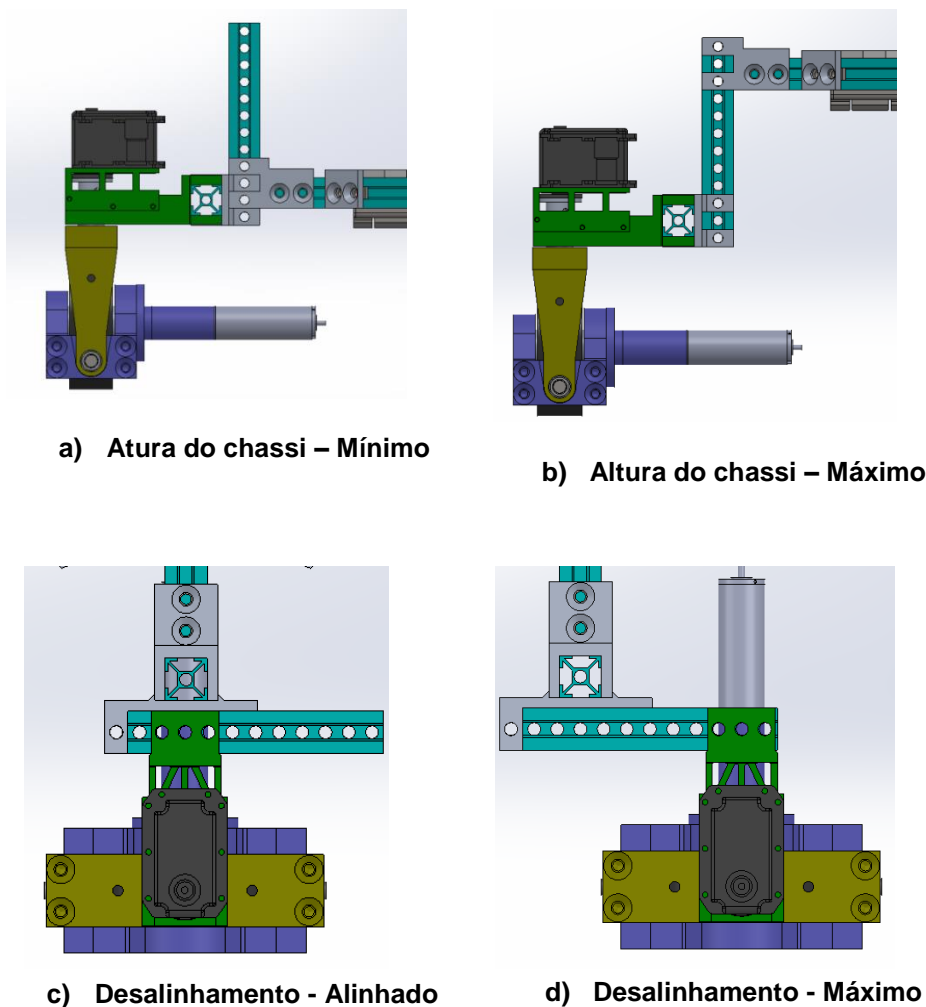


Figura 59 – Regulagens do conjunto de locomoção

e) Rodas que não degradem a superfície de rolagem.

A qualidade da cobertura das rodas, em relação a não degradação da superfície de rolagem, foi testada em campo por Rovani (2013) e foi aprovada. A cobertura apresentou níveis de desgastes satisfatórios e foi mantida pela segunda geração do robô. Considerou-se essa necessidade atendida.

f) Trânsito pela superfície sem se desconectar da mesma ao ultrapassar obstáculos.

O cálculo de validação da conexão, mostrado na seção 4.5.3, foi realizado com apenas três rodas conectadas, considerando a diminuição do campo magnético que a roda sobre ao passar por obstáculos. O resultado foi satisfatório.

g) Realizar manobras pré-programadas.

O atendimento do princípio de *Ackerman* permite que o robô faça manobras pré-programadas com precisão. O sistema de direção com quatro rodas direcionais permite que o robô se movimente sem escorregamento das rodas.

h) Todas as rodas direcionais.

O robô foi projetado, inicialmente, com duas rodas direcionais. Essa condição é suficiente para atender à condição de *Ackerman*. Com quatro rodas direcionais, o robô ganha dinâmica de movimento e diminui o espaço para a realização das manobras. Decidiu-se, então, pela especificação do robô com direcionamento nas suas quatro rodas.

i) Motores em todas as rodas.

Cada roda foi projetada para ter controle de tração individual. Para atender a essa necessidade foram escolhidos motores menores dos utilizados na primeira geração do robô.

j) Mudança de direção do robô com o mínimo de escorregamento das rodas.

Essa necessidade foi atendida com a especificação de quatro rodas direcionais, e o atendimento à condição de *Ackerman* durante as manobras.

k) Fixação e sustentação dos componentes eletrônicos já especificados.

O chassi desenvolvido a partir dos perfis estruturais em alumínio permite a fixação dos componentes eletrônicos através de uma chapa de alumínio perfurada.

l) Motores orientados para dentro do robô.

Para atender à solicitação do Departamento de Eletrônica, os motores foram orientados para parte de baixo do chassi. Essa condição foi atendida girando as rodas direcionais laterais em 180°, diminuindo o volume total do robô.

Quando o equipamento de ultrassom for definido, deve-se haver uma preocupação com o espaço interno disponível para a sua instalação.

Conforme discutido na seção 5.1.4, esse espaço pode ser aumentado redefinindo-se as dimensões dos sete perfis do chassi.

A construção modular do robô em subconjuntos permite que o espaço inferior disponível seja aumentado apenas com o aumento do tamanho do chassi.

m) Articulação para o sensor de distância.

Um mecanismo de articulação para o sensor de distância foi desenvolvido. Através de um servo-motor, o sensor pode variar a sua posição variando-se o ângulo do mecanismo.

n) Suporte para o sensor laser.

O suporte para o sensor laser foi desenvolvido. Esse suporte, fixado no perfil de regulagem de altura do sistema de locomoção frontal, é direcionado pra frente do robô e possui três regulagens angulares discretas.

Com isso, pode-se afirmar que as necessidades dos clientes descritas na seção 4.3 foram atendidas, assim como, os itens constantes na especificação do produto descritos na seção 4.4.

6 PROTÓTIPO

A construção do protótipo iniciou-se após a conclusão do projeto detalhado. Após a modelagem e os desenhos de fabricação concluídos, solicitou-se o orçamento dos componentes usinados e comerciais.

Foram cotados três orçamentos, conforme detalhado no ANEXO B. A melhor proposta para usinagem das peças e fornecimento dos componentes comerciais atingiu um valor total de R\$ 40.230,00. Devido à suspensão temporária do patrocínio da Petrobras, acordado com o PRH no início do projeto, não foi possível seguir com a fabricação do protótipo.

A necessidade de cumprimento dos prazos acadêmicos impediu que se aguardasse por uma definição do retorno dos investimentos. Optou-se, então, pela construção de um protótipo simplificado, custeado pelos alunos, para prova da solução conceitual do projeto. O protótipo possui o mesmo princípio funcional para os sistemas mecânicos definidos no projeto preliminar. Porém, foi eliminado espaço destinado aos componentes eletrônicos.

6.1 PROTÓTIPO SIMPLIFICADO

A simplificação do projeto foi realizada removendo os motores de tração, os motores direcionais e os componentes eletrônicos. Os perfis estruturais, projetados para dar rigidez, foram substituídos por chapas e barras delgadas de alumínio com dimensões comerciais padrões. As articulações, projetados com rolamentos, foram substituídas por conexões através do contato direto entre parafusos e furos dos componentes de alumínio. Os eixos e anéis trava foram substituídos, também, por parafusos, porcas e arruelas.

A usinagem dos componentes foi realizada buscando-se soluções simples de fabricação como furos, cortes e dobras utilizando-se das ferramentas disponíveis no laboratório. A usinagem destinada ao acabamento das peças foi desconsiderada.

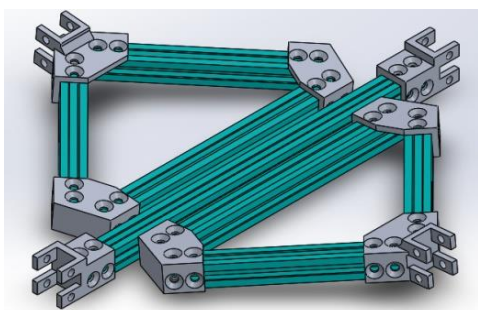
Construiu-se, então, um protótipo para verificar a funcionalidade do chassi, sistema de suspensão e cambagem em uma superfície cilíndrica de 550 mm, adquirida para teste.

6.2 DETALHAMENTO DAS ALTERNATIVAS SIMPLIFICADAS DO PROTÓTIPO

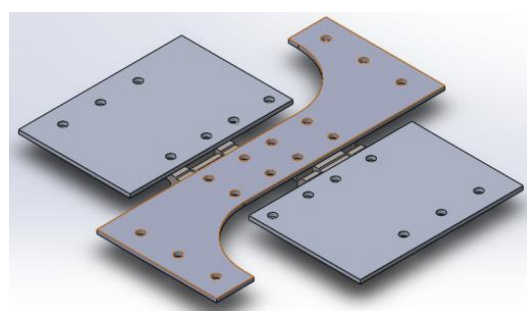
Nesta seção serão detalhados os subsistemas do protótipo simplificado.

6.2.1 Chassi e sistema de suspensão

A alternativa obtida para o chassi definido no projeto do robô e mostrada na Figura 60 (a) foi o conjunto simplificado mostrado na Figura 60 (b). A estrutura foi construída utilizando chapas de alumínio com espessura padrão de 3,175 mm e as mesmas dobradiças definidas no projeto do robô. As dobradiças originais foram mantidas para testar sua rigidez e resistência para a aplicação.



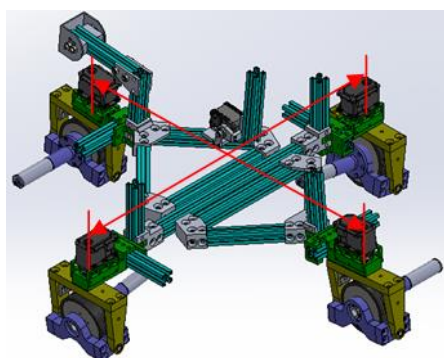
a) Chassi projeto segunda geração



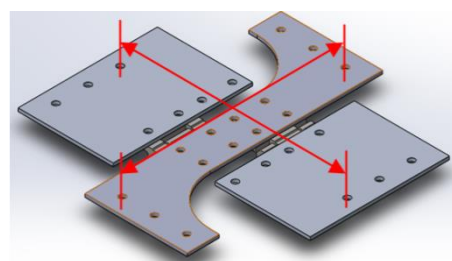
b) Chassi projeto para prova de conceito

Figura 60 – Chassi da segunda geração e alternativa simplificada

A distância entre centros das rodas do robô sem desalinhamento, foi reduzida de 590 mm, especificado no projeto detalhado, Figura 61 (a), para 220 mm, no projeto simplificado, conforme Figura 61 (b).



a) Distância entre centros das rodas: 590 mm



b) Distância entre centros das rodas: 220 mm

Figura 61 – Distância entre centros das rodas

Na solução simplificada, o desalinhamento das rodas possui apenas três regulagens, posições (a), (b) e (c) mostradas na Figura 62. As regulagens possibilitam a montagem alinhada das rodas na posição (a), desalinhadas com 63,5 mm na posição (b) e com 127 mm na posição (c).

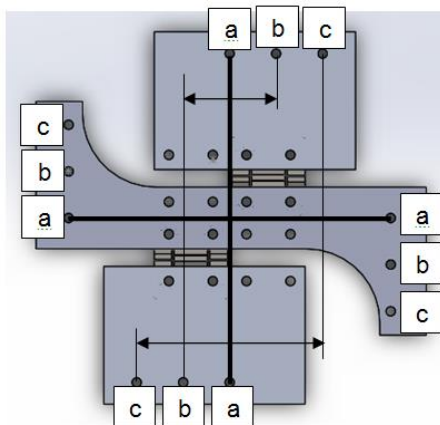
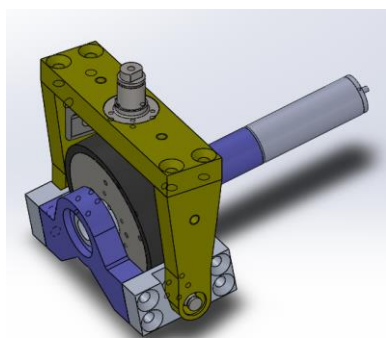


Figura 62 – Solução simplificada para desalinhamento das rodas

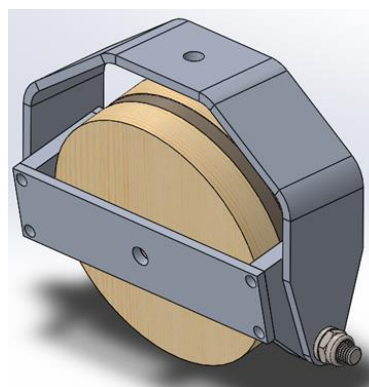
A regulagem de altura do chassi foi desconsiderada porque o protótipo simplificado não será utilizado para acomodar o equipamento de inspeção.

6.2.2 Sistema direcional e de cambagem

O conjunto de locomoção que possui os sistemas de cambagem e direção mostrados na Figura 63 (a) foi substituído pelo conjunto simplificado mostrado na Figura 63 (b).



a) Sistema direcional e de cambagem do projeto detalhado



b) Sistema direcional e de cambagem do projeto simplificado

Figura 63 – Projeto do protótipo simplificado

O protótipo simplificado desconsiderou, também, os limitadores para o ângulo de cambagem devido à ausência do risco de contato do motor com a superfície.

As rodas do robô simplificado foram construídas em madeira e possuem as mesmas dimensões da roda original. Para os testes de conexão em superfície metálica, utilizaram-se as rodas do robô de primeira geração.

O *layout* final do projeto do protótipo simplificado pode ser visto na Figura 64.

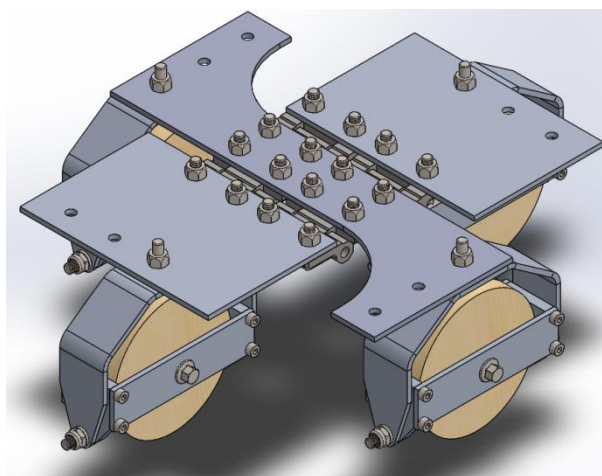


Figura 64 – Projeto do protótipo simplificado

A Figura 65, mostra o protótipo simplificado acoplado em uma superfície cilíndrica com raio de 550 mm, para a qual ele foi projetado.

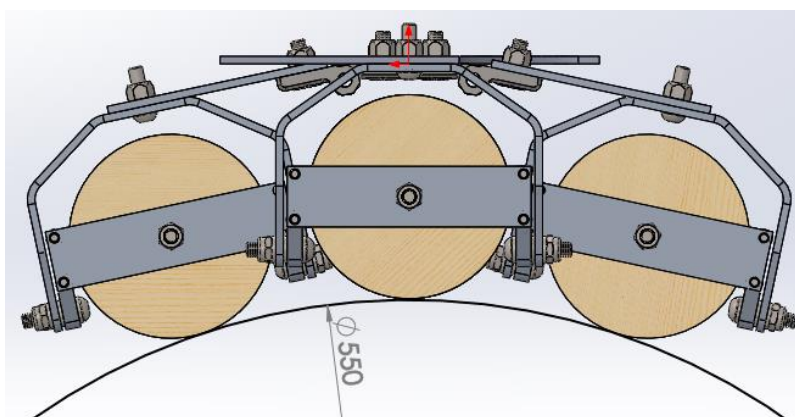


Figura 65 – Protótipo simplificado em cilindro de diâmetro 550 mm

6.3 CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO

A construção do protótipo foi realizada pelos alunos Alexandre Bianchi Rosa e Ronaldo Antonio Gnoatto.

6.3.1 Ferramentas utilizadas

Corte das chapas do chassi: serra tico-tico.

Corte das barras do sistema direcional e de cambagem: serra meia esquadria.

Furação dos pontos de fixação das dobradiças e furos passantes dos eixos: furadeira elétrica.

Furação dos mancais de cambagem: furadeira de bancada.

6.3.2 Aquisição de componentes comerciais e matéria prima

Os componentes para fabricação do protótipo simplificado, listados a partir do modelo 3D, são descritos na Tabela 11.

Tabela 11 – Componentes comerciais para protótipo simplificado

<i>Item</i>	<i>Descrição</i>	<i>Qtde</i>	<i>Unid.</i>	<i>Componente</i>
Barra de alumínio	L = 1 1/2"; E = 1/8"	1050	Mm	Garfo
Barra de alumínio	L = 1"; E = 1/8"	900	Mm	Cambagem
Barra de alumínio	L = 1 1/2"; E = 1/4"	420	mm	Cambagem
Chapa alumínio	E = 1/8"	120x1000	mm	Chassi
Dobradiça	KANYA B60–20	4	unid	chassi
Parafuso	M6x20 - sextavado interno. ISO 7380	12	unid	Cambagem
Parafuso	M6x20 - sextavado interno ISO 10642	16	unid	Dobradiças
Parafuso	M6x50x18 - sextavado flange. ISO 4162	4	unid	Eixo da roda
Porca	M6 – sextavado ISO 7719	32	unid	Fixação geral
Arruela	Arruela M6	32	unid	Fixação geral
Barra circular Nylon	Diâmetro 20mm	200	mm	Eixo roda

O custo de desenvolvimento do protótipo somou um total de R\$ 107,00, divididos conforme Tabela 12.

Tabela 12 – Custos do protótipo simplificado

<i>Item</i>	<i>Valor R\$</i>
Chapas de alumínio.	R\$ 32,00
Dobradiças.	R\$ 60,00
Parafusos, porcas e arruelas.	R\$ 15,00

6.3.3 Fabricação dos componentes

As chapas da estrutura do chassi foram cortadas e furadas, utilizando serra tico-tico e furadeira elétrica manual, conforme Figura 66.

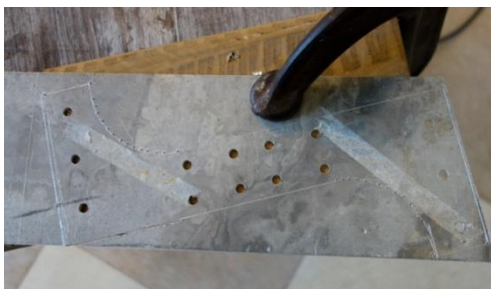


Figura 66 – Marcação do contorno e furação das chapas do chassi

Os demais componentes, fabricados a partir das barras de alumínio, foram cortados utilizando-se uma serra de meia esquadria (Figura 67).

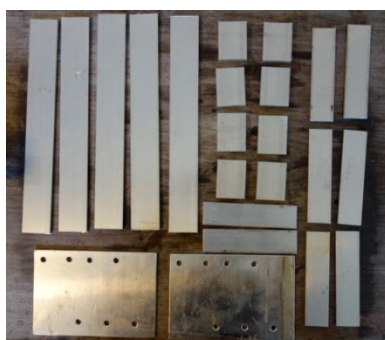


Figura 67 – Corte dos componentes em barra chata de alumínio

As furações e acabamentos foram realizados nos componentes, preparando-os para montagem, conforme Figura 68.



Figura 68 – Furação e acabamento dos componentes para montagem

A partir da usinagem dos componentes, realizou-se a dobra das barras de alumínio para construção dos garfos da cambagem. O processo foi executado utilizando uma morsa para fixação.

Após a fabricação dos componentes, foi realizada a montagem do protótipo.

6.4 TESTES

Os testes foram realizados a partir das seguintes combinações de posições:

- a) Rodas paralelas com robô na horizontal;
- b) Rodas paralelas com robô na vertical;
- c) Rodas em condição de Ackerman para curva de raio zero com robô na horizontal;
- d) Rodas em condição de Ackerman para curva de raio zero com robô na vertical.

Dois tipos de testes foram realizados com o protótipo simplificado. A primeira teve o objetivo de verificar a capacidade de acoplamento do robô em superfícies curvas. A segunda foi verificar a capacidade de carga do robô nas diversas posições possíveis.

6.4.1 Capacidade de conexão em superfícies curvas

Para a realização dos testes com o protótipo simplificado, foi utilizado um tambor de 200L de aço. O tambor possui um raio de curvatura de 550 mm, consideravelmente menor que os tanques de petróleo para permitir a visualização dos princípios funcionais do robô. Por esse motivo, a funcionalidade da cambagem e da suspensão puderam ser observadas.

A geometria cilíndrica, com raio menor que os tanques da Petrobras, exigiu, também, maior variação dos ângulos de cambagem e da suspensão, para realização das manobras.

O tambor, mostrado nas imagens da Tabela 13, possui nervuras ao longo de sua superfície, que simulam as saliências dos cordões de solda.

6.4.2 Realização dos testes

6.4.2.1 Objetivo

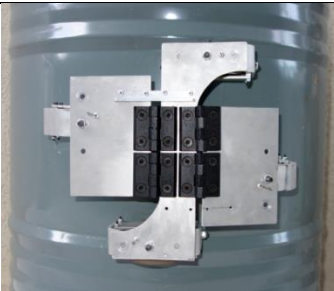
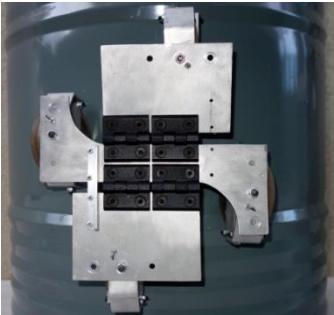
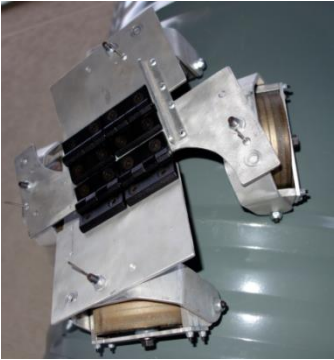
Verificar a capacidade da nova topologia desenvolvida se conectar em superfícies curvas, simulando posições e movimentos em um tanque cilíndrico.

6.4.2.2 Método

Conectou-se o robô à lateral do tambor de 200L, foram simuladas as posições de deslocamento linear do robô na horizontal e na vertical da parede do cilindro. Foi simulada, também, a manobra do robô em seu próprio centro geométrico.

As posições do robô e direcionamento das rodas podem ser vistos na Tabela 13.

Tabela 13 – Posições de teste do protótipo

Configuração	Imagem
<p>Direção do chassi: Horizontal</p> <p>Direção das rodas: Paralelas</p>	
<p>Direção do chassi: Vertical</p> <p>Direção das rodas: Paralelas</p>	
<p>Direção do chassi: Variável</p> <p>Direção das rodas: Em condição de Ackerman para raio de curva zero (giro no próprio eixo do robô)</p>	

Em cada uma das configurações, o robô foi movimentado manualmente com deslocamento linear com as rodas paralelas e manobra de rotação sobre o próprio centro geométrico, com as rodas configuradas atendendo a condição de Ackerman.

Adicionalmente, testou-se a acomodação do sistema de cambagem e suspensão, em uma calota esférica utilizada para testes, fornecida CENPES (Figura 69).



Figura 69 – Teste com protótipo simplificado na calota esférica

6.4.2.3 Resultados

Os testes de funcionalidade do sistema de suspensão e cambagem foram satisfatórios. As quatro rodas foram mantidas em contato total com a superfície durante os deslocamentos lineares verticais e horizontais e também em movimento de manobra do robô com rotação no próprio eixo. A acomodação do ângulo de cambagem das rodas e da suspensão, mostrado na Figura 70, garante a conexão completa de cada uma das rodas na direção normal à superfície de rolagem.



Figura 70 – Acomodação do ângulo de cambagem e suspensão do protótipo

Os testes identificaram a necessidade de controle da rotação das rodas durante o movimento para manter o alinhamento do chassi. Durante a movimentação do robô, verificou-se a inclinação do perfil central do chassi, causada

pela rotação não controlada das rodas. A rotação pode ser observada pela linha azul na Figura 71. Essa rotação pode fazer com que a estrutura do mancal de cambagem entre em contato com a superfície de rolagem, identificada pelo círculo vermelho na Figura 71.



Figura 71 – Inclinação do perfil central do chassi no protótipo

Para evitar a inclinação do perfil central, foi eliminada a articulação de um dos triângulos, conforme Figura 72.



Figura 72 – Cantoneira de fixação do triângulo com o perfil central do chassi.

Esta fixação limita a inclinação do perfil central, eliminando o problema do contato da estrutura com a superfície de rolagem.

6.4.3 Capacidade de carga do robô

Após validação da capacidade de acoplamento do robô em superfícies curvas, o robô foi conectado a uma calota esférica, fornecida pelo CENPES, para verificar a capacidade de carga do robô. Esta calota possui as mesmas características geométricas e propriedades de material, definidas pela norma, que as de um tanque utilizado nas refinarias da Petrobras.

Os testes foram realizados com o robô em três posições distintas para verificar a capacidade de carga do robô sobre uma superfície vertical que é posição crítica para o sistema de cambagem passiva.

6.4.3.1 Rodas alinhadas com carga longitudinal (Racl)

6.4.3.1.1 Objetivo: Racl

O objetivo deste teste foi medir a capacidade de carga do robô em deslocamento vertical retilíneo sobre uma superfície vertical.

6.4.3.1.2 Ferramentas e equipamentos utilizados: Racl

- a) Uma balança digital com resolução de 0,1kgf e capacidade de 50 kgf;
- b) Cunhas de madeira.

6.4.3.1.3 Componentes utilizados: Racl

- a) Protótipo simplificado com rodas originais da primeira geração do robô;
- b) Calota esférica fornecida pelo CENPES com espessura de 50,8 mm.

6.4.3.1.4 Set-up: Racl

Protótipo simplificado foi conectado a superfície da calota esférica, as suas rodas tiveram seu movimento de rotação travado por cunhas. O alinhamento foi configurado para um deslocamento retilíneo, conforme Figura 73.

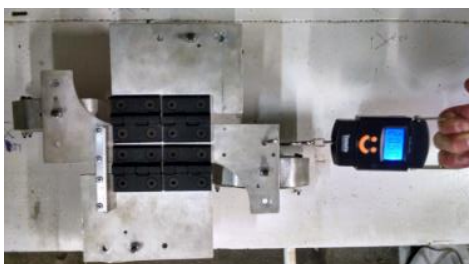


Figura 73 – Teste de capacidade de carga (Racl)

6.4.3.1.5 Método: Racl

Tracionou-se o chassi com a balança na direção longitudinal ao alinhamento das rodas. A força de tração foi acrescida gradativamente até ocorrer o

escorregamento do das. O valor apresentado na iminência do escorregamento foi registrado. O teste foi repetido cinco vezes.

6.4.3.1.6 Cálculos: Racl

O *set-up* permitiu a leitura dos dados da capacidade de carga do robô em kgf, sem necessidade de conversões.

6.4.3.1.7 Resultados obtidos: Racl

Na Tabela 14 são apresentados os valores de força de atrito em deslizamento longitudinal para uma roda em superfície limpa e suja.

Tabela 14 – Capacidade de carga do robô na condição Racl

<i>Medição</i>	<i>Valor registrado [kgf]</i>
Racl 1	41
Racl 2	40
Racl 3	42
Racl 4	41
Racl 5	39

A capacidade de carga média do robô em condição de Racl é: 40,6 kgf. O desvio padrão calculado é de 1,14 kgf.

6.4.3.2 Rodas alinhadas com carga transversal (Ract)

6.4.3.2.1 Objetivo: Ract

O objetivo deste teste foi medir a capacidade de carga do robô em deslocamento horizontal retilíneo sobre uma superfície vertical.

6.4.3.2.2 Ferramentas e equipamentos utilizados: Ract

- c) Balança digital com resolução de 0,1kgf e capacidade de 50 kgf;
- d) Cunhas de madeira.

6.4.3.2.3 Componentes utilizados: Ract

- c) O protótipo simplificado com as rodas originais utilizadas na primeira geração do robô;
- d) Calota esférica fornecida pelo CENPES com espessura de 50,8 mm.

6.4.3.2.4 *Set-up*: Ract

O protótipo simplificado foi conectado à superfície da calota esférica e as suas rodas foram travadas através de cunhas de madeira, mantendo-se alinhadas em posição de deslocamento retilíneo (Figura 74).



Figura 74 – Teste de capacidade de carga (Ract)

6.4.3.2.5 Método: Ract

Tracionou-se o chassi com a balança na direção transversal ao alinhamento das rodas. A força de tração foi acrescida gradativamente até o escorregamento do robô. O valor apresentado na iminência do escorregamento foi registrado. O teste foi repetido cinco vezes.

6.4.3.2.6 Cálculos: Ract

O *set-up* permitiu a leitura dos dados da capacidade de carga do robô em kgf, sem necessidade de conversões.

6.4.3.2.7 Resultados obtidos: Ract

Na Tabela 15 são apresentados os valores de força de atrito em deslizamento longitudinal para a roda em superfície limpa e suja.

Tabela 15 – Capacidade de carga do robô na condição Ract

<i>Medição</i>	<i>Valor registrado [kgf]</i>
Ract 1	39
Ract 2	40
Ract 3	39
Ract 4	41
Ract 5	39

A capacidade de carga média do robô em condição de R_{acl} é: 39,6 kgf. O desvio padrão calculado é 0,89 kgf.

6.4.3.3 Rodas em condição de Ackerman para raio de giro zero (R_{cargz})

6.4.3.3.1 Objetivo: R_{cargz}

O objetivo deste teste foi medir a capacidade de carga do robô em deslocamento horizontal sobre uma superfície vertical em deslocamento retilíneo.

6.4.3.3.2 Ferramentas e equipamentos utilizados: R_{cargz}

- e) Balança digital com resolução de 0,1kgf e capacidade de 50 kgf;
- f) Cunhas de madeira.

6.4.3.3.3 Componentes utilizados: R_{cargz}

- e) O protótipo simplificado com as rodas originais da primeira geração do robô;
- f) Calota esférica fornecida pelo CENPES com espessura de 50,8 mm.

6.4.3.3.4 Set-up: R_{cargz}

O protótipo simplificado foi conectado à superfície da calota esférica e suas rodas foram travadas através das cunhas de madeira, mantendo-se alinhadas em posição de manobra de giro sobre o seu próprio centro geométrico (Figura 75).

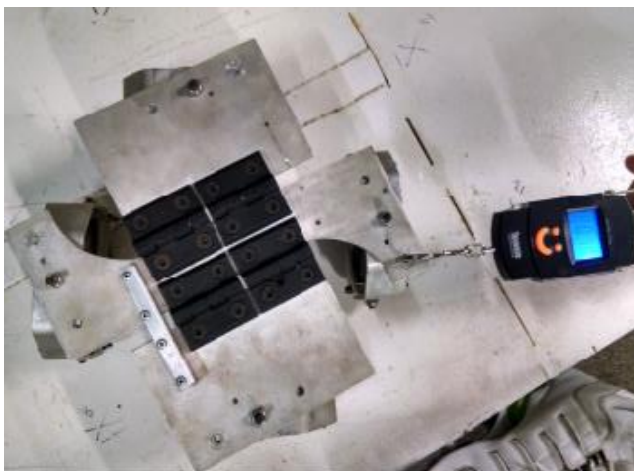


Figura 75 – Teste de capacidade de carga (R_{cargz})

6.4.3.3.5 Método: Rcargz

Tracionou-se o chassi com a balança. e a força de tração foi acrescida gradativamente até ocorrer o escorregamento do robô. O valor apresentado na iminência do escorregamento foi anotado e o teste foi repetido cinco vezes.

6.4.3.3.6 Cálculos: Rcargz

O *set-up* permitiu a leitura dos dados da capacidade de carga do robô em kgf, sem necessidade de conversões.

6.4.3.3.7 Resultados obtidos: Rcargz

Na Tabela 16 são apresentados os valores de força de atrito em deslizamento longitudinal para uma roda em superfície limpa e suja.

Tabela 16 – Capacidade de carga do robô na condição Rcargz

<i>Medição</i>	<i>Valor registrado [kgf]</i>
Rcargz 1	40
Rcargz 2	39
Rcargz 3	38
Rcargz 4	41
Rcargz 5	39

A capacidade de carga média do robô em condição de Rcargz é: 39,4 kgf. Com desvio padrão de 1,14 kgf.

6.5 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS TESTES

O protótipo simplificado emprega o conceito da topologia desenvolvida e se mostrou aplicável para a segunda geração do robô.

O sistema de cambagem passiva garante o melhor ângulo de conexão da roda com a superfície curva em qualquer posição e movimento.

O sistema de suspensão articulada no chassi, associado ao sistema de cambagem passiva, garante a conexão das quatro rodas simultaneamente sobre qualquer superfície curva, com o raio mínimo estipulado pelo projeto.

O sistema direcional omnidirecional garante a manobrabilidade do robô, permitindo realizar trajetórias retilíneas, curvas com qualquer raio e girar sobre o próprio centro geométrico (curva de raio zero).

O conjunto de locomoção desenvolvido apresentou resultados satisfatórios durante o teste de capacidade de carga Ract. O escorregamento das rodas ocorreu antes do tombamento da cambagem passiva, garantindo o não tombamento das rodas durante deslocamento horizontal em parede vertical. Os valores medidos no teste confirmou o resultado do cálculo de força para tombamento da roda, descrito na seção 4.5.3.

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

7.1 CONCLUSÕES

O presente trabalho apresenta a concepção da segunda geração do robô de inspeção de solda em superfícies metálicas verticais, inclinadas, cilíndricas e esféricas. Apresenta, também, a construção do protótipo simplificado para prova de conceito.

Foi realizada uma análise detalhada dos princípios funcionais dos subsistemas mecânicos de robôs e uma análise detalhada da tecnologia disponível no mercado e nos projetos do robô de primeira geração.

Chegou-se a uma nova concepção, buscando aproveitar as melhorias obtidas nos projetos da primeira geração do robô e desenvolver soluções para as limitações identificadas.

Os projetos realizados pelo CENPES, Buch e Souza (2010) e Rovani (2013) serviram como base para o desenvolvimento da segunda geração do robô UTFPR. Algumas partes, como as rodas magnéticas de Rovani (2013) e os perfis estruturais de alumínio, utilizados por Buch e Souza (2010), foram mantidas. Mas muito conhecimento foi adquirido com as experiências desses trabalhos.

Foram realizados testes para validar a utilização da roda desenvolvida para o robô de primeira geração até decidir-se pela sua utilização.

Por fim, optou-se por realizar a concepção do robô de segunda geração com uma topologia diferente da apresentada por Buch e Souza (2010) e Rovani (2013). Diversas geometrias de topologia foram discutidas ao longo do projeto, associando-as às opções de sistemas mecânicos. Assumiu-se o desafio de investir em uma topologia inovadora que integrasse a funcionalidade do chassi com os sistemas de suspensão e cambagem.

E escolha do chassi em formato de losango bipartido e articulado gerou muita discussão sobre sua funcionalidade. O conceito da cambagem foi construído levando-se em conta a necessidade de reduzir ao máximo a altura do seu eixo de giro. Nesse momento buscou-se opinião de profissionais mais experientes na área de projetos e mecanismos. Contou-se com a contribuição de professores da UFPR e UTFPR para validação da escolha.

O sistema de direção mostra outra evolução da primeira para a segunda geração do robô. A primeira, que apresentava direcionamento apenas pela diferença de rotação entre as rodas deu lugar a um sistema com quatro rodas direcionais. Em conjunto com o Departamento de Eletrônica, escolheu-se servo motores adequados e o mecanismo para instalação e transmissão de torque ao garfo da roda foi desenvolvido.

Durante o desenvolvimento, as reuniões com o Departamento de Eletrônica foram constantes e pode-se observar também a evolução da tecnologia eletrônica embarcada. Porém, a evolução simultânea do projeto mecânico e eletrônico exigiu modificações no projeto mecânico anteriormente já definidas, o que dificultou o cumprimento do cronograma.

O equipamento de leitura de ultrassom não foi definido durante a execução do projeto. Para contornar o problema dessa indefinição, construiu-se o chassi com regulagens de altura, para facilitar a instalação posterior do equipamento.

O chassi também foi projetado para que seu tamanho possa ser facilmente alterado.

Concluído o modelo 3D e os desenhos de fabricação optou-se por construir um protótipo simplificado para testar os novos conceitos do projeto.

O sistema de cambagem e direção tiveram resultados satisfatórios e atenderam a todas as expectativas criadas no início do projeto. O sistema de suspensão também se mostrou funcional. Porém, identificou-se durante os testes com o protótipo a necessidade de um sistema de controle do ângulo da articulação do chassi. Soluções para esse problema são apresentadas na seção 7.2.

A segunda geração do robô de inspeção de solda manteve os pontos fortes conquistados pelos projetos anteriores e apresenta soluções alternativas e funcionais para os problemas de cambagem, suspensão e direcionamento.

Com isto, pode-se dizer que o objetivo geral do trabalho foi atingido.

7.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O projeto do robô de segunda geração de inspeção de solda foi realizado considerando todas as etapas de fabricação e montagem. Verifica-se a necessidade de construção de um protótipo para testar todas as funcionalidades com os

equipamentos de eletrônica embarcados. Porém, antes do processo de construção, verifica-se a necessidade de corrigir um problema encontrado durante os testes com o protótipo simplificado.

O protótipo simplificado, construído para testar a funcionalidade do sistema de suspensão e cambagem do robô, identificou a necessidade de um sistema de controle dos ângulos do chassi, para evitar a rotação do chassi central durante a passagem por obstáculos.

O sistema de controle deve identificar o desalinhamento e corrigi-lo com a rotação das rodas.

Uma sugestão mais simples e mais eficaz pode ser obtida eliminando-se o retângulo central formado pela barra que liga as rodas laterais.

Conforme descrito no Capítulo cinco, a geometria da topologia é formada por dois triângulos simétricos e um retângulo central que os conecta.

Ao conectar as dobradiças de um triângulo diretamente ao outro, elimina-se o efeito indesejável da rotação do perfil central. Porém algumas modificações adicionais deverão ocorrer para que isso seja possível. Os suportes laterais que conectam os perfis de um dos triângulos deverão ser adaptados para conectar diretamente às rodas laterais, uma vez que o perfil central não existirá mais.

8 REFERÊNCIAS

BLANCHARD, B. S. e FABRYCKY, W. J. **Systems, engineering and analysis**.

Editora Prentice Hall do Brasil Ltda., Rio de Janeiro: 1990.

DANA. **Eixo diferencial traseiro**. 2015 Disponível em:

<http://www.dana.com.br/veiculos-leves-visao-geral/transmissao/eixos-diferenciais>.

Acesso em: 28 de fevereiro de 2015

DITCHBURN, *et. al.* **NDT of Welds: State of The Art**, NDT&E International, 1996.

LASI. **Esfera de armazenamento de gás**. 2013. Disponível em:

http://http://www.sel.eesc.usp.br/lasi/lasi_joomla/index.php/8-lasi/pesquisa/42-robomovel-para. Acesso em: 06 de maio de 2013.

NASA. **Robô Curiosity rover**. 2015 Disponível em:

<http://mars.jpl.nasa.gov/msl/mission/rover/>. Acesso em 28 de fevereiro de 2015

NBR 7821/1983. **Tanques soldados para armazenamento de petróleo e derivados**. 1983

OKUMURA, Toshie. **Engenharia de soldagem e aplicações**. Rio de Janeiro: Editora LTC, 1982. 1p.

ROVANI, Anderson. **Desenvolvimento do protótipo de um robô para inspeção de cordões de solda em superfícies metálicas verticais**. 2013. 157 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Industrial Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

ROZENFELD, Henrique; FORCELINE, A. Fernando; AMARAL, C. Daniel; TOLEDO, C. José; SILVA, L. Sérgio; ALLIPRANDINI, H. Dário, SCALICE, K. Régis. **Gestão de Desenvolvimento de Produtos: Uma referência para a melhoria do processo** São Paulo: Editora Saraiva, 2006. 94p.

VETOR TECNOLOGIA. **Tanque em aço carbono**. 2013. Disponível em: <http://www.vetortecnologia.com.br/cases/>. Acesso em: 06 de maio de 2013.

APENDICE A PEÇAS ELETRÔNICAS

Nesta seção serão detalhados os equipamentos eletrônicos definidos pelo Departamento de Eletrônica, as suas especificações e as suas características.

O dispositivo de inspeção ainda não foi definido. Portanto não será incluído nessa seção.

A.1 Motor de tração

Fabricante: Maxon

Modelo: EC4Pole 22

Referência: 311536



Figura 76 – Motor de tração Maxon EC4Pole 22 ref.: 311536

Dados técnicos do motor a 24 V:

- Tensão nominal: 24 V
- Corrente sem carregamento: 223 mA
- Corrente inicial: 70,4 A
- Corrente nominal (máxima corrente contínua): 4,95 A
- Rotação sem carregamento: 16900 rpm
- Rotação nominal: 15600 rpm

- Torque nominal: 64,9 mNm
- Torque de bloqueio: 954 mNm
- Eficiência máxima: 89%

Especificações térmicas:

- Resistência térmica carcaça / ambiente: 8,01 K/W
- Resistência térmica bobina / carcaça: 1 K/W
- Constante térmica de tempo da bobina: 6,66 s
- Constante térmica de tempo do motor: 701 s
- Temperatura ambiente: -20 °C...+100 °C
- Temperatura máxima permissível da bobina: +150 °C

Especificações mecânicas (rolamentos pré-carregados):

- Velocidade máxima permitida: 25000 rpm
- Folga axial em carregamento axial < 5 N: 0 mm
- Folga axial em carregamento axial > 5 N: 0,14 mm
- Folga radial: pré-carregado
- Carregamento axial máximo (dinâmico): 4 N
- Máxima força em encaixe por pressão (Estático): 53 N
- Máxima força em encaixe por pressão (Estático com eixo suportado): 1000 N
- Máximo carregamento radial (5 mm da flange): 16 N
- Peso do motor: 175 g

Dimensões:

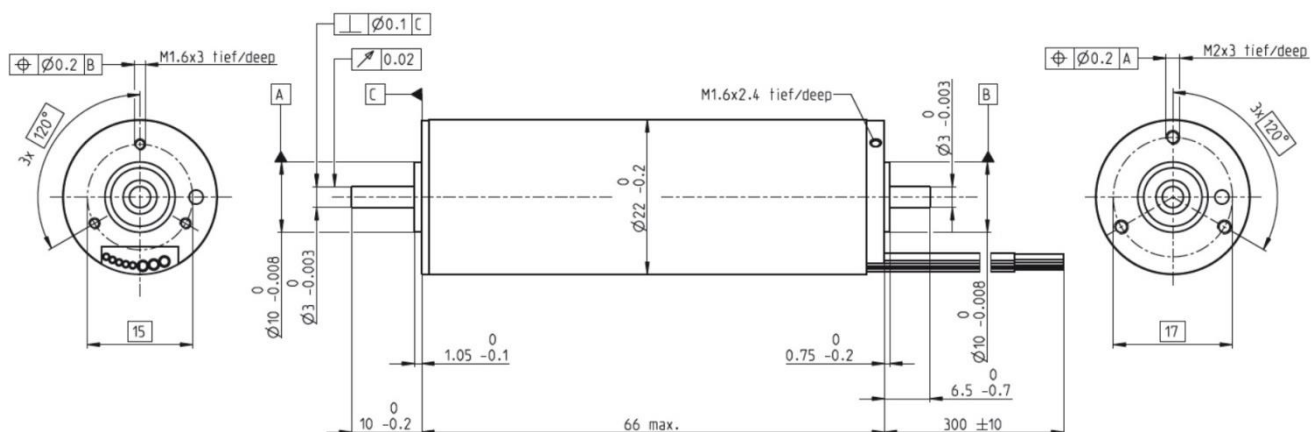


Figura 77 – Dimensões do motor de tração Maxon EC4Pole 22

A.2 Redutores

Fabricante: Maxon

Modelo: Planetary Gearhead GP 22 HP

Referência: 370797



Figura 78 – Redutor Maxon Planetary Gearhead GP 22 HP

Dados técnicos:

- Redução: 316:1
- Máximo diâmetro do eixo do motor: 3,2 mm
- Numero de estágios: 4

- Máximo torque contínuo: 3,4 Nm
- Torque intermitente permitido: 3,8 Nm
- Eficiência máxima: 49%
- Peso: 91 g
- Comprimento do redutor (L1): 45,7 mm
- Redutor planetário: dentes retos
- Eixo de saída: Aço inoxidável endurecido
- Rolamento na saída: esférico
- Folga radial a 10 mm da flange: max 0,2 mm
- Folga axial: max 0,1 mm
- Carregamento máximo axial: 100 N
- Máximo carregamento em encaixe por pressão: 100 N
- Sentido da rotação de saída: igual de entrada
- Rotação de entrada recomendada: < 12000 rpm
- Temperatura ambiente recomendada: -40 °C...+100 °C
- Máximo carregamento radial a 10 mm da flange: 110 N

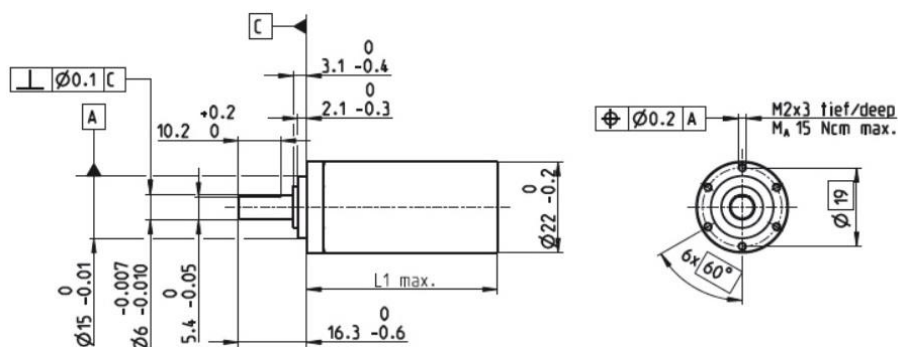


Figura 79 – Dimensões do redutor Maxon Planetary Gearhead GP 22 HP

A.3 Encoder

Fabricante: Maxon

Modelo: HEDL 5540 500 CPT, 3 Channels, with Line Driver RS 422

Referência: 110512



Figura 80 – Encoder Maxon HEDL 5540 500 CPT, 3 Channels, with Line Driver RS 422

Especificações:

- Número de canais: 3
- Frequência máxima: 100 Hz
- Rotação máxima: 12000 rpm
- Diâmetro do eixo: 3 mm

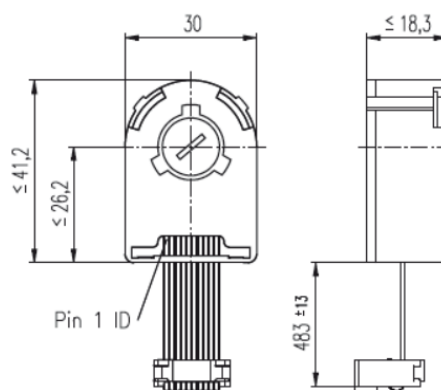


Figura 81 – Dimensões encoder Maxon HEDL 5540 500 CPT, 3 Channels, with Line Driver RS 422

A.4 Servo motor para as rodas direcionais

Fabricante: Dynamixel

Fabricante do motor: Maxon motor

Modelo: MX series

Referência: MX64T



Figura 82 – Servo motor Dynamixel MX64T

Especificações:

- Peso: 126 g
- Redução: 200/1
- Tensão de operação: 10 a 14,8 V (Recomendado 12 V)
- Torque de bloqueio: 5,5 Nm (10 V); 6 Nm (12 V); 7,3 Nm (14,8 V)
- Rotação sem carregamento: 58 rpm (10 V); 63 rpm (12 V); 78 rpm (14,8 V)
- Intervalo de operação: 360 ° (rotação contínua)
- Resolução: 0,088 °

- Temperatura de operação: -5 °C...80 °C

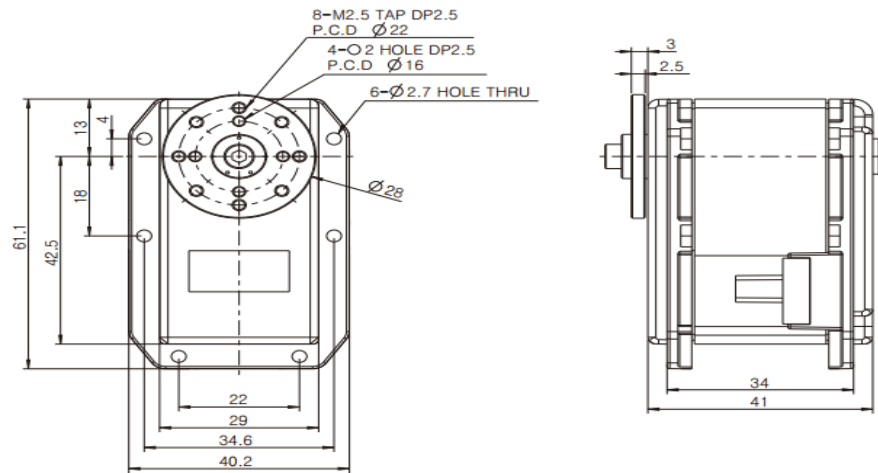


Figura 83 – Dimensões servo motor Dynamixel MX64T

A.5 Servo motor para o sensor laser

Fabricante: Dynamixel

Fabricante do motor: Maxon motor

Modelo: AX series

Referência: AX18A



Figura 84 – Servo motor Dynamixel AX18A

Especificações:

- Peso: 54,5 g
- Redução: 254/1
- Tensão de operação: 12 V
- Torque de bloqueio: 1,8 Nm
- Rotação sem carregamento: 97
- Intervalo de operação: 300 ° ou rotação contínua
- Resolução: 0,29 °C
- Temperatura de operação: -5 °C...85 °C

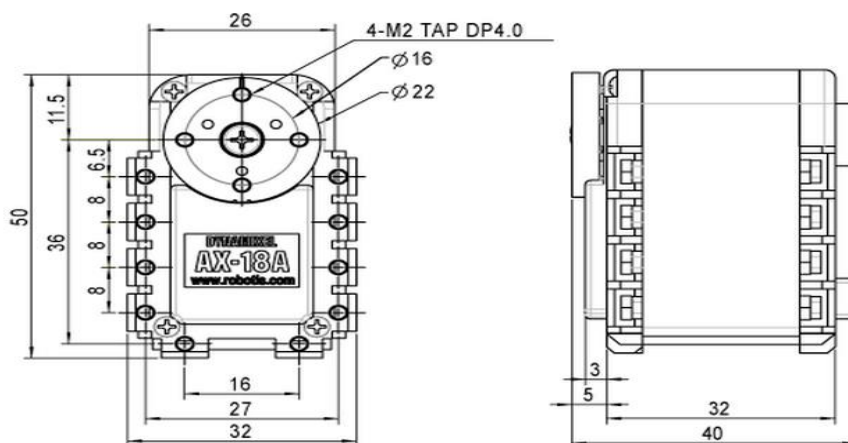


Figura 85 – Dimensões servo motor Dynamixel AX18A

A.6 Placa mãe

Fabricante: Advantech

Modelo: PCM 3363

Referência: PCM-3363D- 1GS6A1E

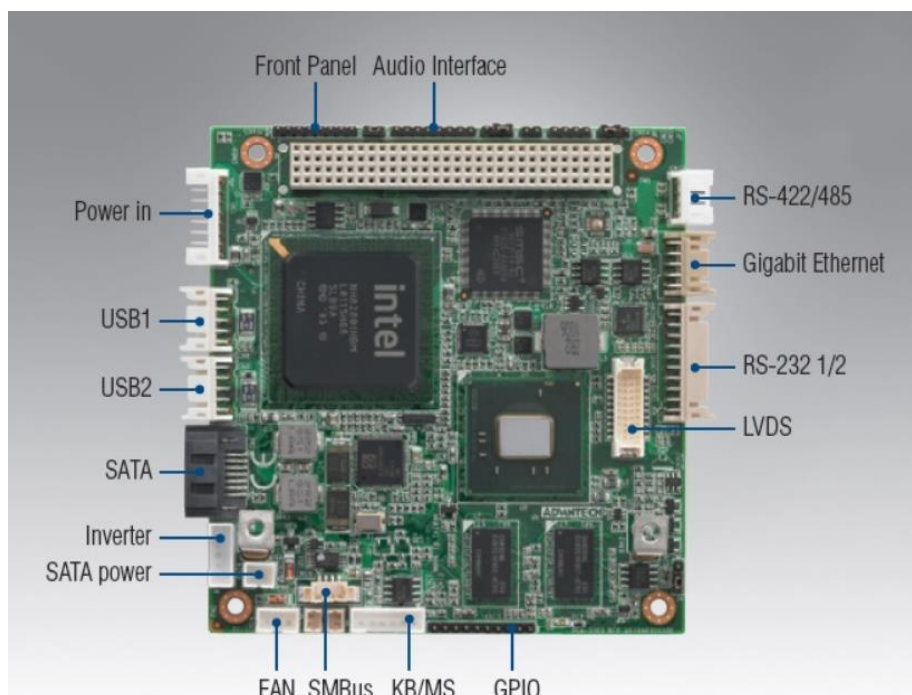


Figura 86 – Placa mãe PCM-3363

Características:

- Tensão: 5V para arrancada (12V opcional para LCD)
- Dimensões: 96 x 90 mm (3.8" x 3.5")
- Peso: 664 g
- Altura: lado superior: 19.4 mm; lado inferior: 10.6 mm
- Temperatura ambiente: operacional 0 °C...60 °C; não operacional -40 °C...85 °C

A.7 Driver do motor

Fabricante: Maxon

Modelo: EPOS2 24/5

Referência: 367676



Figura 87 – Driver motor EPOS2 24/5

Características:

- Temperatura ambiente: -10 °C...+85 °C
- Umidade relativa: 20...80%
- Peso: 170 g
- Dimensões: 105 x 83 x 24 mm

A.8 Sensor inercial

Fabricante: Sparton

Modelo: AHRS-8 Attitude Heading Reference System



Figura 88 – Sensor inercial AHRS-8 Attitude Heading Reference System

Características:

- Temperatura de operação: -40 °C...85 °C
- Peso: 16 g
- Dimensões: 42 x 28 x 11 mm

A.9 Sensor de distância

Fabricante: Dimetix

Modelo: EDS-C



Figura 89 – Sensor de distância Dimetix EDS-C

Características:

- Peso: 280 g
- Dimensão: 106 x 62 x 45 mm
- Temperatura de operação: -10 °C...+50 °C

A.10 Sensor laser

Fabricante: Hokuyo

Modelo: URG-04LX



Figura 90 – Sensor laser Hokuyo URG-04LX

Características:

- Peso: 160 g
- Dimensões: 50x50x70mm
- Temperatura de operação: 10 °C...50 °C
- Umidade: 85% ou menos

A.11 Câmera

Fabricante: Mesa Imaging

Modelo: 3D ToF Camera SR4000



Figura 91 – Câmera Mesa Imaging SR4000

Características:

- **Peso: 510 g**
- **Dimensões: 65 x 65 x 76 mm**

APENDICE B TABELA DE PEÇAS E REFERÊNCIAS

Na tabela abaixo estão listadas as peças e as referências das peças do robô de segunda geração.

Tabela 17 – Tabela de peças e referências

Subconjunto	Subconjunto de ordem 2	NOME DA PEÇA (Quantidade) Referência	Insumo
CHASSI 110000	CHASSI - TRIANGULO (2) 110100	CHASSI - TRIANGULO - PERFIL CURTO (2) 110101	Kanya- Usinado
		CHASSI - TRIANGULO - PERFIL LONGO 110102	Kanya- Usinado
		CHASSI - TRIANGULO - SUP AGUDO (2) 110103	Usinado
		CHASSI - TRIANGULO - SUP OBTUSO 110104	Usinado
		CHASSI - TRIANGULO - GRADE 110105	Usinado
		CHASSI - TRIANGULO - ESPAÇADOR (7) 110106	Usinado
		CHASSI - PERFIL CENTRAL 110201	Kanya- Usinado
CHASSI - DOBRADICAS KANYA ZN-DIECASTING MODELO B60-20 (4) 110301	Comprado		
CHASSI - SUP RETO (2) 110401	Usinado		
CONJ LOCOMOÇÃO (4) 120000	CONJ LOCOMOÇÃO- RODA (4) 120100	CONJ LOCOMOÇÃO- RODA - ARO ROSCADO 120101	Rovani*
		CONJ LOCOMOÇÃO- RODA - BUCHA 120102	Rovani*
		CONJ LOCOMOÇÃO- RODA - ÍMÃ (2) 120103	Rovani*
		CONJ LOCOMOÇÃO- RODA - ARO FURADA 120104	Rovani*
		CONJ LOCOMOÇÃO- RODA - PNEU 120105	Rovani*
	CONJ LOCOMOÇÃO - EIXO DA RODA 120201	Usinado	
	CONJ LOCOMOÇÃO - ESPAÇADOR (2) 120301	Usinado	
	CONJ LOCOMOÇÃO - SUP ENTRE EIXO DA RODA E CAMBAGEM DO LADO MOTOR 120401	Usinado	
	CONJ LOCOMOÇÃO - SUP ENTRE EIXO DA RODA E CAMBAGEM 120501	Usinado	
	CONJ LOCOMOÇÃO - MANCAL CAMBAGEM (2) 120601	Usinado	
	CONJ LOCOMOÇÃO - EIXO FLANGE CAMBAGEM (2) 120701	Usinado	
	CONJ LOCOMOÇÃO - GARFO CAMBAGEM (2) 120801	Usinado	
	CONJ LOCOMOÇÃO - SUP ENTRE GARFOS E EIXO FLANGE DIRECIONAL 120901	Usinado	
	CONJ LOCOMOÇÃO - EIXO FLANGE DIRECIONAL 121001	Usinado	
	CONJ LOCOMOÇÃO - SUP DO SERVO 121101	Usinado	
	CONJ LOCOMOÇÃO - SUP DO SERVO ESPELHADO 121201	Usinado	

	CONJ LOCOMOÇÃO - LUVA ENTRE FLANGE DO SERVO E EIXO FLANGE DIRECIONAL 121301	Usinado
	PERFIL DE REGULAGEM (2) 900001	Kanya-Usinado
	CONJ LOCOMOÇÃO - CANTONEIRA 90 GRAUS KANYA (2) 121401	Comprado
	CONJ LOCOMOÇÃO - FLANGE DE MOTOR DE TRAÇÃO 121501	Usinado
	CONJ LOCOMOÇÃO - MOTOR DE TRAÇÃO 121601	Eletrônica
	CONJ LOCOMOÇÃO - SERVO MOTOR DIRECIONAL 121701	Eletrônica
	CONJ LOCOMOÇÃO - SUP ENTRE PERFIS DE REGULAGEM VERTICAL E HORIZONTAL 121801	Usinado
	CONJ LOCOMOÇÃO - SUP ENTRE EIXO DIRECIONAL E PERFIL REGULAGEM HORIZONTAL 121901	Usinado
ELETRÔNICOS 130000		Eletrônica
CONJ SENSOR DE DIST 140000	CONJ SENSOR DE DIST - SUP BASE 140101	Usinado
	CONJ SENSOR DE DIST - SERVO MOTOR 110602	Eletrônica
	CONJ SENSOR DE DIST - MANCAL 140103	Usinado
	CONJ SENSOR DE DIST - EIXO FLANGE ESQ 140104	Usinado
	CONJ SENSOR DE DIST - EIXO FLANGE DIR 140105	Usinado
	CONJ SENSOR DE DIST - FLANGE ESQ 140107	Usinado
	CONJ SENSOR DE DIST - FLANGE DIR 140108	Usinado
	CONJ SENSOR DE DIST - BARRA DE LIGAÇÃO FLANGES 140109	Usinado
CONJ SENSOR LASER 150000	PERFIL DE REGULAGEM 900001	Kanya-Usinado
	CONJ SENSOR LASER - SUP 150101	Kanya-Usinado
	CONJ SENSOR LASER - ESPAÇADOR (2) 150102	Kanya-Usinado
	CONJ SENSOR LASER - SENSOR LASER 150103	Eletrônica
	CONJ SENSOR LASER - CHAPA DE FIXAÇÃO (2) 150104	Kanya-Usinado
OFF THE SHELF	PORCA RETANGULAR M6	Comprado

* Peças desenvolvidas por Rovani (2013).

APENDICE C SIMULAÇÕES EM SUPERFÍCIES CURVAS

O acoplamento do robô de segunda geração foi simulado para determinar o raio mínimo das superfícies curvas que são capazes de acomodar o sistema de suspensão e cambagem desenvolvidos.

Para todas as simulações foram reservadas distâncias de 3 mm do solo referentes à altura máxima do cordão de solda, especificada pela norma ABNT NBR 7821/1983 (1983 p 44).

C.1 SUPERFÍCIE CILINDRICA EXTERIOR VERTICAL EM ROTA LINEAR

- ❖ Raio do cilindro: 1682 mm;
- ❖ Ângulo de cambagem das rodas laterais: 10° ;
- ❖ Ângulo de cambagem das rodas frontal e traseira: 0° ;
- ❖ Ângulos entre os triângulos do chassi: $5,2^\circ$.

Parâmetro limitante: ângulo de cambagem das rodas laterais.

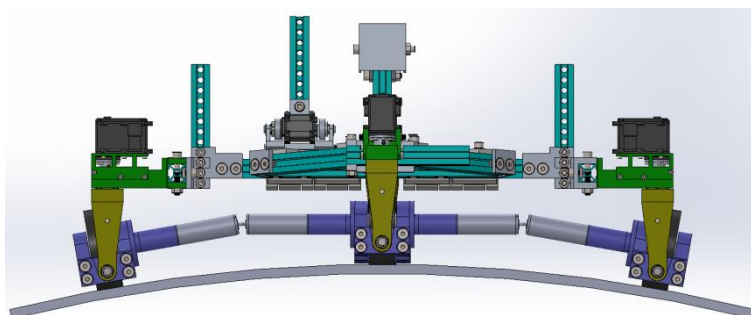


Figura 92 – Simulação do robô C.1

C.2 SUPERFÍCIE CILINDRICA EXTERIOR VERTICAL EM CURVA DE RAIOS ZERO

- ❖ Raio do Cilindro: 1682mm
- ❖ Ângulo de cambagem das rodas laterais: 10°
- ❖ Ângulo de cambagem das rodas frontal e traseira: $5,2^\circ$
- ❖ Ângulo entre os triângulos do chassi: $5,2^\circ$

Parâmetro limitante: ângulo de cambagem das rodas laterais.

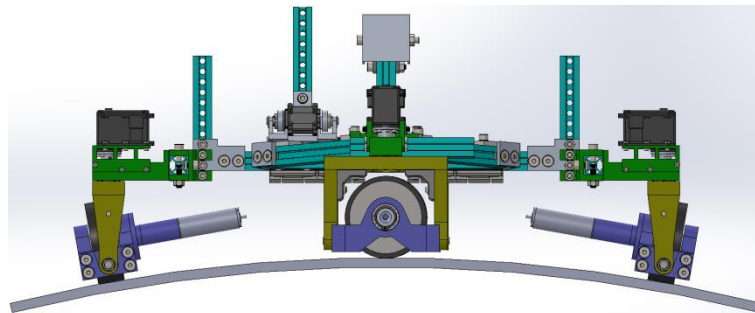


Figura 93 - Simulação do robô C.2

C.3 SUPERFÍCIE CILINDRICA INTERIOR VERTICAL EM ROTA LINEAR

- ❖ Raio do cilindro: 1672mm
- ❖ Ângulo da cambagem das rodas laterais: $5,5^\circ$
- ❖ Ângulo da cambagem das rodas frontais e traseira: 0°
- ❖ Ângulo entre os triângulos do chassi: $5,5^\circ$

Parâmetro limitante: distância do garfo de cambagem ao solo.

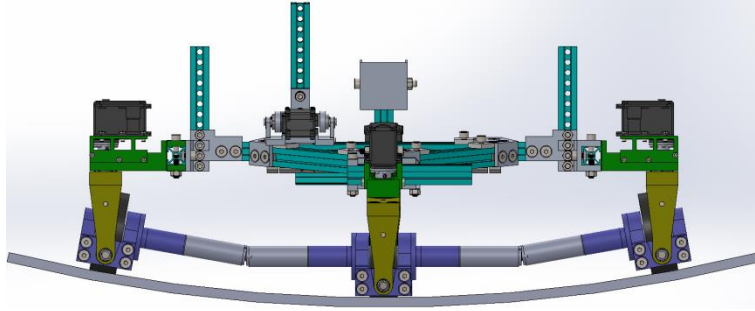


Figura 94 – Simulação do robô C.3

C.4 SUPERFÍCIE CILINDRICA INTERIOR VERTICAL EM CURVA DE RAIOS ZERO

- ❖ RAIOS DO CILINDRO: 1672mm
- ❖ CANGAGEM RODAS LATERAIS: 10°
- ❖ CANGAGEM RODAS FRONTAL E TRASEIRA: 5,5°
- ❖ TRIANGULOS DO CHASSI: 5,5°

Parâmetro limitante: distância do garfo de cangagem ao solo.

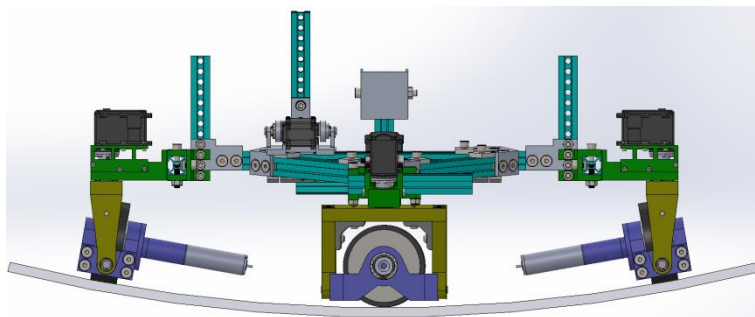


Figura 95 – Simulação do robô C.4

C.5 SUPERFÍCIE CILINDRICA EXTERIOR HORIZONTAL EM ROTA LINEAR

- ❖ RAIO DO CILINDRO: 1682mm
- ❖ CAMBAGEM RODAS LATERAIS: 0°
- ❖ CAMBAGEM RODAS FRONTAL E TRASEIRA: 0°
- ❖ TRIANGULOS DO CHASSI: 5,1°

Parâmetro limitante: distância do garfo de cambagem ao solo.

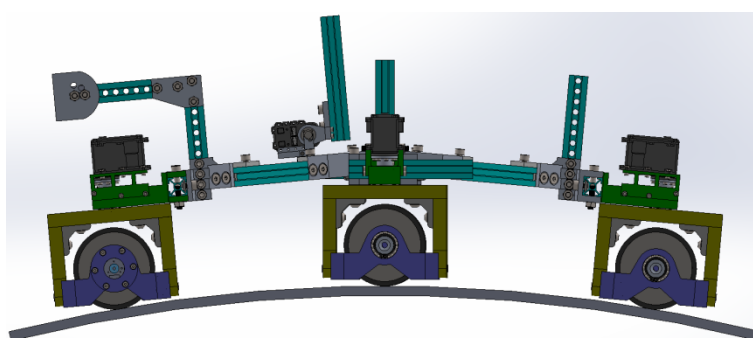


Figura 96 – Simulação do robô C.5

C.6 SUPERFÍCIE CILINDRICA EXTERIOR HORIZONTAL EM CURVA DE RAIOS ZERO

- ❖ RAIO DO CILINDRO: 1682mm
- ❖ CAMBAGEM RODAS LATERAIS: 0°
- ❖ CAMBAGEM RODAS FRONTAL E TRASEIRA: 4°
- ❖ TRIANGULOS DO CHASSI: 5,1°

Parâmetro limitante: distância do garfo de cambagem ao solo descrito na seção C.5.

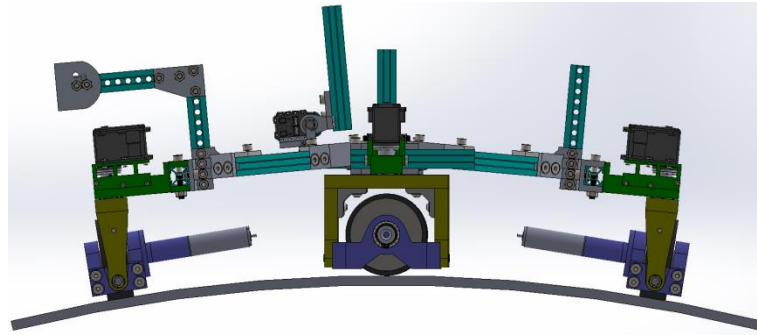


Figura 97 – Simulação do robô C.6

C.7 SUPERFÍCIE CILINDRICA INTERIOR HORIZONTAL EM ROTA LINEAR

- ❖ RAIO DO CILINDRO: 1672mm
- ❖ CANGAGEM RODAS LATERAIS: 0°
- ❖ CANGAGEM RODAS FRONTAL E TRASEIRA: 0°
- ❖ TRIANGULOS DO CHASSI: $5,7^\circ$

Parâmetro limitante: distância do garfo de cangagem ao solo.

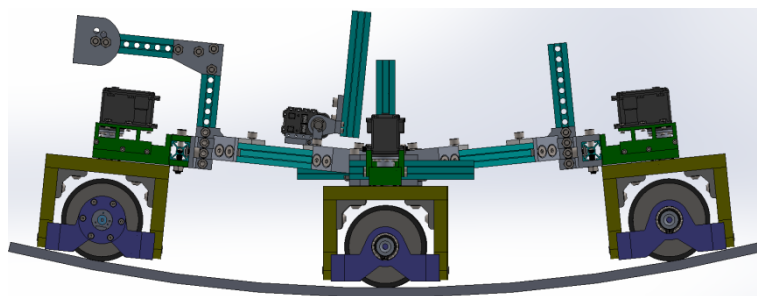


Figura 98 – Simulação do robô C.7

C.8 SUPERFÍCIE CILÍNDRICA INTERIOR HORIZONTAL EM CURVA DE RAIOS ZERO

- ❖ RAIOS DO CILINDRO: 1672mm
- ❖ CANGAGEM RODAS LATERAIS: 0°
- ❖ CANGAGEM RODAS FRONTAL E TRASEIRA: 3,5°
- ❖ TRIANGULOS DO CHASSI: 5,7°

Parâmetro limitante: distância do garfo de cangagem ao solo.

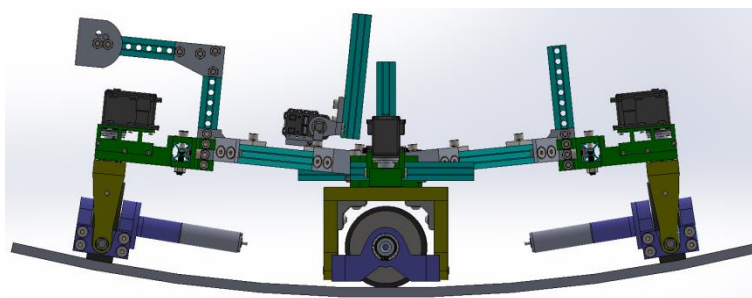


Figura 99 – Simulação do robô C.8

C.9 SUPERFÍCIE ESFERICA EXTERIOR EM ROTA LINEAR

- ❖ RAIOS DA ESFERA: **2090mm**
- ❖ CANGAGEM RODAS LATERAIS: 8,5°
- ❖ CANGAGEM RODAS FRONTAL E TRASEIRA: 0°
- ❖ TRIANGULOS DO CHASSI: 0°

Parâmetro limitante: distância do garfo de cangagem ao solo descrito na seção C.5.

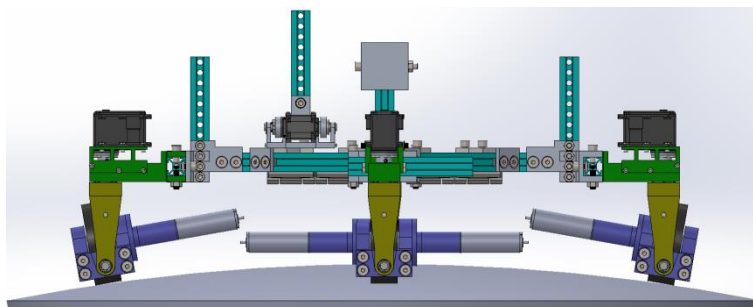


Figura 100 – Simulação do robô C.9

C.10 SUPERFÍCIE ESFERICA EXTERIOR EM CURVA DE RAIOS ZERO

- ❖ RAIOS DA ESFERA: 2090mm
- ❖ CANGAGEM RODAS LATERAIS: 10°
- ❖ CANGAGEM RODAS FRONTAL E TRASEIRA: 10°
- ❖ TRIANGULOS DO CHASSI: 0°

Parâmetro limitante: ângulo de cangagem das rodas laterais.

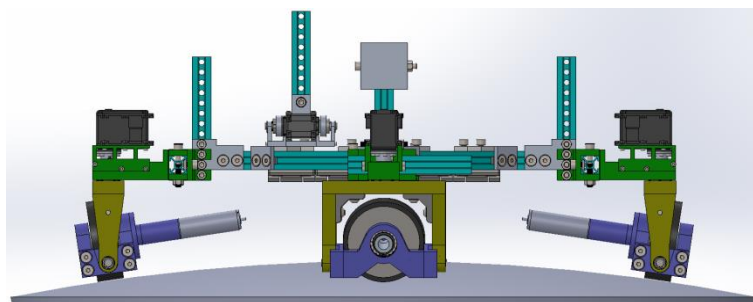


Figura 101 – Simulação do robô C.10

C.11 SUPERFÍCIE ESFERICA INTERIOR EM ROTA LINEAR

- ❖ RAIOS DA ESFERA: 2080mm
- ❖ CANGAGEM RODAS LATERAIS: 6°

- ❖ CANGAGEM RODAS FRONTAL E TRASEIRA: 0°
- ❖ TRIANGULOS DO CHASSI: 0°

Parâmetro limitante: distância do garfo de cangagem ao solo.

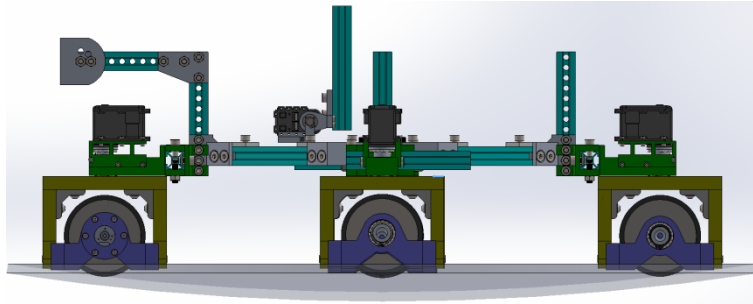


Figura 102 – Simulação do robô C.11

C.12 SUPERFÍCIE ESFERICA INTERIOR EM CURVA DE RAIOS ZERO

- ❖ RAIOS DA ESFERA: 1719mm
- ❖ CANGAGEM RODAS LATERAIS: 10°
- ❖ CANGAGEM RODAS FRONTAL E TRASEIRA: 10°
- ❖ TRIANGULOS DO CHASSI: 0°

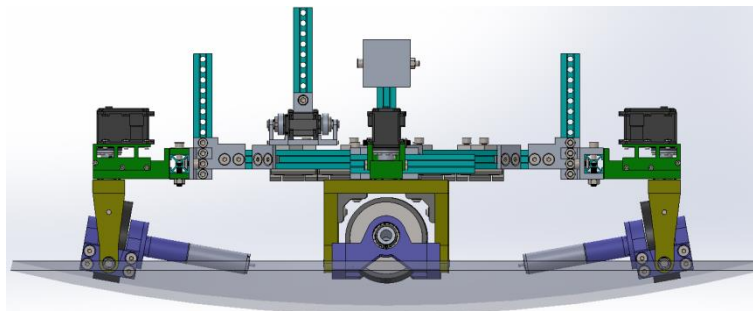


Figura 103 – Simulação do robô C.12

C.13 CONSIDERAÇÕES

As simulações demonstraram que o robô possui capacidade de se conectar e se movimentar em cilindros com raio mínimo de 1682mm de raio e em esferas com raio mínimo de 2090mm.

ANEXO A DIREÇÃO DINÂMICA

Para manobrar um veículo é necessário um sistema de direção para girar as rodas. A direção dinâmica, analisada neste capítulo, introduz novas exigências e desafios.

SISTEMA CINEMÁTICO

Considere um veículo com direção nas rodas dianteiras que está virando à esquerda, conforme mostrado na Figura 104. Quando o veículo está se movendo muito lentamente, há uma condição cinemática entre as rodas internas e externas que lhes permite transformar antiderrapante. A condição é chamada condição de Ackerman e é expressa por:

$$\cot \delta_o - \cot \delta_i = \frac{w}{l}$$

onde, δ_i é o ângulo de direção da roda interna, e δ_o é o ângulo de direção da roda externa. As trajetórias das rodas de internas e externas são definidas com base no centro de rotação, O.

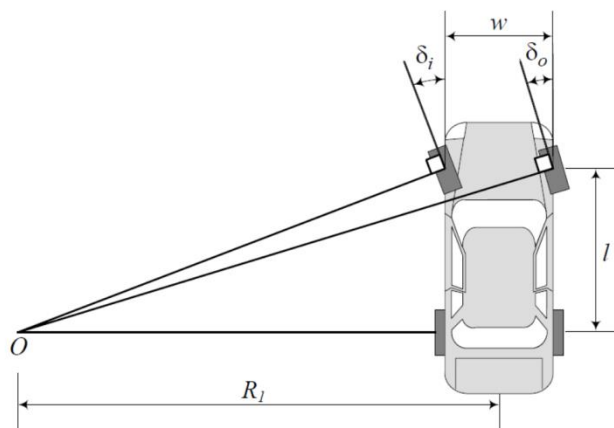


Figura 104 – Condição de Ackerman.

A distância entre os centros das rodas é expresso por w . A distância entre eixos é l . As dimensões w e l são consideradas como largura e comprimento cinemáticos do

veículo. A trajetória do centro de massa de um veículo dirigido se transformará em um círculo de raio R ,

$$R = \sqrt{a_2^2 + l^2 \cot^2 \delta}$$

onde $\bar{\delta}$ é o arco cujo cotangente é a média das cotangentes do ângulo da roda interna e do ângulo da roda externa.

$$\cot \delta = \frac{\cot \delta_o + \cot \delta_i}{2}.$$

O ângulo $\bar{\delta}$ é equivalente ao ângulo de direção de uma bicicleta com a mesma distância entre eixos l e mesmo raio de rotação R .

Para que todas as rodas girem livremente realizando uma curva em uma estrada, a linha normal ao plano de cada pneu, passando pelo seu centro, deve se cruzar em um ponto comum. Essa é a condição de Ackerman. A Figura 105 ilustra um veículo virando à esquerda. A partir das geometrias formadas os ângulos de rotação da roda dianteira interna e externa podem ser calculados.

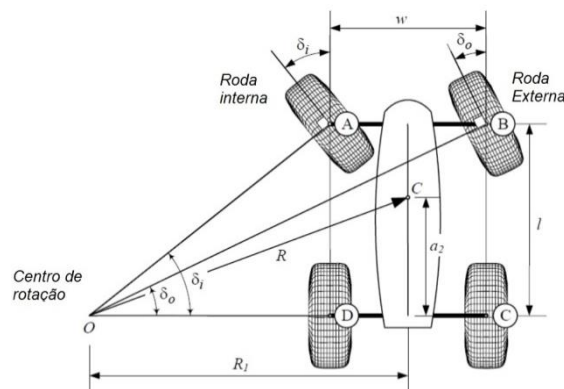


Figura 105 – Veículo com rodas direcionais dianteiras

ANEXO B ORÇAMENTOS PARA USINAGEM

Orçamento 1:

Empresa: BNT FERRAMENTARIA LTDA.

Valor total: R\$ 43.800,00

Orçamento 2:

Empresa: F.PINI USINAGEM INDUSTRIAL LTDA.

Valor total: R\$ 50.171,70

Orçamento 3:

Empresa: PBN INDÚSTRIA E COMÉRCIO DE COMPONENTES INDUSTRIAIS
LTDA.

Valor total: R\$ 40.230,00