



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
TRABALHO DE CONCLUSÃO EM ENGENHARIA DE
CONTROLE E AUTOMAÇÃO

Projeto de um Robô do Tipo Lagarta para Locomoção em Tubos Rígidos

Autor: Eduardo Palma Godoy

Orientador: Rafael A. C. Laranja

Porto Alegre, 28 de dezembro de 2017

Sumário

Sumário	iii
Agradecimentos	v
Resumo	vii
Abstract	vii
Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	xi
Lista de Símbolos	xiii
Lista de Abreviaturas e Siglas	xvii
1 Introdução	1
1.1 Objetivos do Trabalho	2
1.2 Estrutura do Trabalho	2
2 Revisão Bibliográfica	3
2.1 Robôs Tubulares	3
2.2 Mecanismos do Tipo Came	3
2.3 Cinemática de Robôs do Tipo Lagarta	5
2.3.1 Descrição Geral da Locomoção de Robôs Tipo Lagarta	5
2.3.2 Análise da Locomoção de um Robô do Tipo Lagarta	6
2.3.3 Locomoção de um Robô do Tipo Lagarta 1GDL	7
2.4 Atrito Entre Partes Móveis Deslizantes	8
3 Materiais e Métodos	9
3.1 Estrutura do Robô	9
3.2 Estimativa de Atrito e Determinação do Atuador	16
3.3 Elementos de Acoplamento Mecânico	21
3.4 Confecção das Peças em Impressão 3D	23
4 Estudo de Caso	25
5 Resultados	27
6 Conclusões e Trabalhos Futuros	31
7 Referências	33
Apêndice A	35
Apêndice B	37
Apêndice C	39
Apêndice D	41
Apêndice E	43

Agradecimentos

Agradeço principalmente à minha família, especialmente aos meus pais, Eliane Palma Godoy (*in memoriam*) e Valdir Godoy, por ensinarem e incentivarem a buscar a evolução pessoal e profissional constantemente, sempre respeitando o próximo e a sociedade como um todo. Não poderia deixar de agradecer também aos meus avós e minhas tias, que sempre acreditaram em mim e me apoiaram, mesmo com seus recursos limitados, e sempre estiveram dispostos a ajudar no que fosse necessário para que eu alcançasse meus objetivos. Saliento que essa trajetória não seria possível se não fosse pelos professores. Deixo aqui meu amplo agradecimento a todo o corpo docente do curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, que, mesmo com a estrutura limitada disposta pelos poderes públicos às instituições de ensino do nosso país, se mantêm motivados, ano após ano, a transmitir o conhecimento e permitir que engenheiros de qualidade se construam, visando o aprimoramento da mão-de-obra nacional e a consequente evolução da sociedade. Apesar de não ser adepto da igreja evangélica, faço da mensagem do padre R. R. Soares as minhas palavras: “Precisamos construir pontes de pessoas a pessoas, pais a filhos, alunos a professores, família a escola, gestão a conselhos. É preciso construir um caminho de paz, conhecimento e amizade entre todos os seres humanos”.

Resumo

O presente trabalho designa-se ao projeto de um robô tipo lagarta para locomoção em interiores de tubos de perfis circulares. O movimento desse tipo de robô em tubulações permite que sejam realizados reparos e manutenções nas superfícies das mesmas, além de permitir o transporte de componentes como cabos de comunicação e energia, sem a necessidade de procedimentos invasivos que possam vir a comprometer a estrutura da tubulação. A análise do movimento do robô visa a avaliação de sua capacidade de carga e de suas restrições em movimentos curvilíneos. O dispositivo é acionado por um único motor elétrico e a sincronia entre suas partes móveis se dá através de cames dispostas no próprio corpo do robô. O projeto da estrutura, das peças e dos componentes é realizado com o apoio de *software* CAD (*Computer-Aided Design*) para projetos 3D (tridimensionais).

Palavras-chave: robô lagarta, tubulação, came, CAD.

Abstract

Worm robot projects are mostly designed to perform repairs and maintenance on pipe surfaces. Another application for this device is the displacement of components, such as communication and power cables. The main advantage of the use of worm robots in these processes is the absence of the need for invasive procedures that could compromise the tube structure. The present work aims at designing a worm robot for locomotion in the interior of circular-profile tubes. Throughout the execution of the project, the movement analysis of the robot is performed to evaluate the load capacity of the device, as well as its restrictions on curvilinear movements. In the architecture adopted for the design the device is driven by a single electric motor. The synchronization of moving parts is performed through cams made in the body of the robot. The design of the device – structure, parts, and components – is accomplished with the assistance of Computer-Aided Design (CAD) software for tridimensional projects.

Key-word: worm robot, tubes, pipes, cam, CAD.

Lista de Figuras

Figura 1: Vista isométrica de um robô do tipo lagarta de dois elos e quatro patas (Zarrouk, 2012).	1
Figura 2: Representação do princípio de deslocamento de robôs do tipo lagarta	3
Figura 3: Came radial com acionamento de impulsor do tipo faca ou gume (Melo, 2008).	4
Figura 4: Geometria do came cilíndrico com seguidor (Norton, 2009).	5
Figura 5: Representação esquemática da locomoção de um robô do tipo lagarta (Zarrouk, 2012).	6
Figura 6: Posições de cada elo relativas ao quarto elo, como funções do tempo (Zarrouk, 2012).	7
Figura 7: Representação esquemática da locomoção do robô (Zarrouk, 2012).	7
Figura 8: Posição relativa dos elos e abertura e fechamento das patas (Zarrouk, 2012).	8
Figura 9: Característica do atrito de Coulomb (Korondi, 2014).	8
Figura 10: Deslocamentos relativos axiais e longitudinais.	10
Figura 11: Faixa de ângulo de rotação para cada transiente.	10
Figura 12: Parâmetros radiais da estrutura do robô.	12
Figura 13: Parâmetros longitudinais da estrutura do robô.	14
Figura 14: Projeto do corpo do robô.	15
Figura 15: Projeto do elo do robô.	16
Figura 16: Eixos de referência dos movimentos do robô.	16
Figura 17: Diagrama de forças no corpo do robô.	Error! Bookmark not defined.
Figura 18: Diagrama de forças do elo em movimento.	Error! Bookmark not defined.
Figura 19: Diagrama de forças das patas agarradas à tubulação.	Error! Bookmark not defined.
Figura 20: Diagrama de forças e toques atuantes sobre o corpo do robô.	Error! Bookmark not defined.
Figura 21: Projeto completo do robô.	21
Figura 22: Protótipo do robô montado.	27
Figura 23: Teste de capacidade de carga.	28
Figura 24: Teste de capacidade de movimento curvilíneo.	29

Lista de Tabelas

Tabela 1: Valores dos parâmetros radiais da estrutura do robô.	13
Tabela 2: Valores dos parâmetros longitudinais da estrutura do robô.	15
Tabela 3: Especificações técnicas do motor.	21
Tabela 4: Relação de peças e parafusos utilizados no protótipo.	23
Tabela 5: Valor orçado pelos fornecedores para confecção das peças.	24

Lista de Símbolos

C - centro de rotação

r - distância entre o centro de rotação e a superfície (mm)

y - ponto da haste em contato com a superfície

θ - ângulo (rad)

ω - velocidade angular (rad/s)

α - aceleração angular (rad/s²)

R_b - raio da haste do seguidor (mm)

P - ponto de giro do pivô

z - eixo de rotação da came

x_0 - posição inicial do seguidor em relação ao plano de referência (mm)

$\omega_{\text{braço}}$ - velocidade angular do braço (rad/s)

$X^{(i)}$ - posição do elo i (mm)

$X^{(ij)}$ - distância entre os elos i e j (mm)

L_s - distância de deslocamento em um ciclo (mm)

t - tempo (s)

t_{ciclo} - duração de um ciclo do robô (s)

t_m - tempo médio de um elo do robô (s)

n - número de elos

$V_{\text{robô}}$ - velocidade média do robô (m/s)

V_{elo} - velocidade média do elo (m/s)

F_C - força de atrito de Coulomb (N)

v - velocidade de movimento (m/s)

F_f - força de fricção ou atrito (N)

μ - coeficiente de atrito

F_N - força normal (N)

μ_0 - coeficiente de atrito aproximado transiente

θ_r - ângulo de rotação do corpo (rad)

R_{ec} - raio externo do corpo do robô (mm)

A_r - amplitude da curva senoidal do movimento radial (mm)

- C_r - comprimento do arco médio do movimento radial (mm)
- A_l - amplitude da curva senoidal do movimento longitudinal (mm)
- C_l - comprimento do arco médio do movimento longitudinal (mm)
- R_{ic} - raio interno do corpo do robô (mm)
- R_{ie} - raio interno do elo do robô (mm)
- R_{ee} - raio externo do elo do robô (mm)
- f - folga entre a parede externa do corpo e da parede interna do elo (mm)
- D_{it} - diâmetro interno da tubulação (mm)
- L_e - largura do elo do robô (mm)
- L_c - comprimento do corpo do robô (mm)
- f_{elos} - folga entre a proximidade máxima dos elos do robô (mm)
- D_{pinos} - diâmetro dos pinos que atuarão como hastes das cames (mm)
- d_{pb} - distância entre o centro dos pinos e a borda dos elos (mm)
- d_{pp} - distância entre os centros dos pinos de um mesmo elo (mm)
- m_{elo} - massa do elo (kg)
- g - aceleração da gravidade (m/s^2)
- n_{pinos} - número de pinos no elo
- L_s - comprimento do passo do movimento longitudinal do robô (mm)
- F_{carga} - força exercida pela carga transportada (kgf ou N)
- F_{R1} - força do corpo de reação de oposição ao movimento (N)
- m_{corpo} - massa do corpo do dispositivo (kg)
- x - deslocamento relativo do dispositivo na horizontal (m)
- \ddot{x} - aceleração relativa do dispositivo na horizontal (m/s^2)
- ω - velocidade angular de rotação do motor (rad/s ou rpm)
- t - tempo (s)
- F_{a1} - força de atrito entre o elo em movimento e a superfície do tubo (N)
- F_{R2} - força de reação do elo em movimento em oposição ao avanço (N)
- F_{N1} - força normal exercida pela superfície do tubo sobre o elo em movimento (N)
- μ_1 - coeficiente de atrito entre a superfície do tubo e o elo em movimento

F_{N2} - força normal exercida pelo tubo sobre a pata do elo agarrado ao mesmo (N)

F_{a2} - força de atrito entre a pata agarrada à tubulação e a superfície da mesma (N)

μ_2 - coeficiente de atrito entre a pata agarrada à tubulação e a superfície da mesma

F_{a3} - força de atrito entre a extremidade da pata e superfície do corpo em rotação (N)

T_{atrito} - torque de atrito oposto ao movimento de rotação do corpo (kgf.cm)

T_{motor} - torque que deve ser exercido pelo motor (kgf.cm)

CS - coeficiente de segurança

T_{motor}' - torque que deve ser exercido pelo motor com coeficiente de segurança (kgf.cm)

$v_{robô}$ - velocidade média de deslocamento linear do robô (mm/s)

ω_{motor} - velocidade angular da rotação do eixo do motor (rpm ou rad/s)

n_{ciclos} - número de ciclos de movimentos durante um giro completo do eixo do motor

Lista de Abreviaturas e Siglas

CC – Corrente Contínua

3D – Tridimensional

GDL – Grau De Liberdade

PWM – Pulse Width Modulation

CAD – Computer Aided Design

STL – Standard Triangle Language

SLI – Slide

Qtd. – Quantidade

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

LAMECC – Laboratório de Mecânica e Controle

LIFE – Laboratório de Inovação e Fabricação da Escola de Engenharia da UFRGS

1 Introdução

Tubulações, como qualquer outra estrutura mecânica, estão sujeitas a danos de naturezas diversas. Tubulações podem sofrer com processo de entupimento progressivo causado por acúmulo de resíduos. Além disso, ciclos térmicos, impactos mecânicos, vibrações, corrosão, dentre outros fatores, podem causar problemas que venham a curto ou longo prazo prejudicar a operação da malha como um todo. Os impactos causados por problemas dessa natureza são de vital relevância, principalmente quando relacionados a questões ambientais e econômicas (Costa, 2008).

Nas indústrias de gás, óleo e em transporte de fluido de uma maneira geral, equipamentos de inspeção e transporte de componentes no interior de tubulações são dispositivos que possuem uma grande demanda de utilização. A utilização de máquinas nessas aplicações se dá majoritariamente por razão da eliminação do fator humano no que compete à exposição a ambientes de risco e de difícil acesso. Dentro desse contexto, existe a necessidade de desenvolvimento de equipamentos que se desloquem no interior de tubulações, com o propósito de realizar ações como a desobstrução e inspeção de linhas, ou o transporte de componentes, como cabos de energia ou dados, pelo interior das mesmas (Pieres, 2016).

Para as aplicações mencionadas, muitas vezes, são utilizados robôs do tipo lagarta (*worm robots*) que se deslocam a partir da variação da distância entre seus elos e do movimento de abertura e fechamento de suas patas (ambos movimentos sincronizados). Esses robôs geralmente compreendem dois elos, um em cada extremidade de seu corpo, com patas em ambos os elos, como ilustrado na Figura 1. Também é comum que essa arquitetura de robô possua três atuadores: um responsável pela variação da distância entre os elos e os outros dois responsáveis pelos movimentos das patas anteriores e posteriores. Uma série de abordagens de arquiteturas de robôs do tipo lagarta foram desenvolvidas por diversos autores até o momento. Dentre elas, podem-se citar robôs controlados por múltiplos atuadores de bobina magnética, com alimentação interna (baterias) controlados por motores lineares, confeccionados a partir de células infláveis ativadas por bombas ou elos elásticos controlados por gradiente de pressão (Zarrouk, 2012).

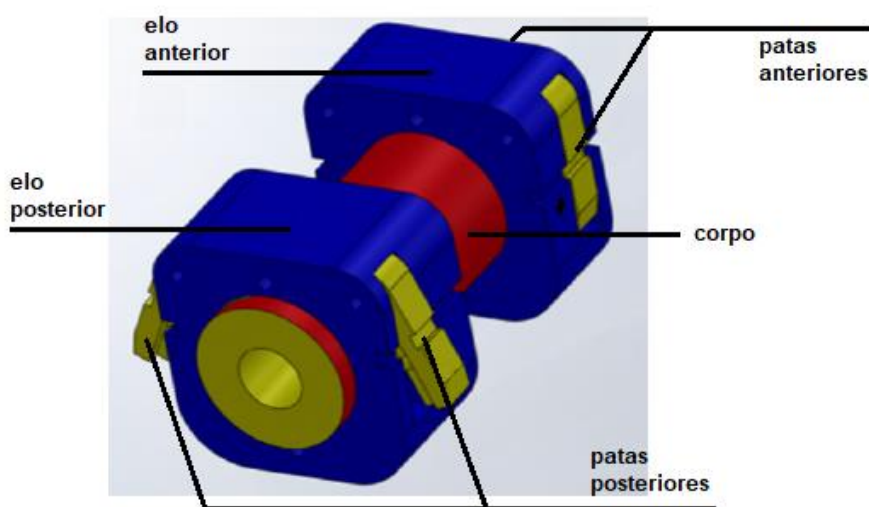


Figura 1: Vista isométrica de um robô do tipo lagarta de dois elos e quatro patas (Zarrouk, 2012).

Nas arquiteturas de robôs lagarta citadas anteriormente, sempre existem complexidades de projeto em relação à estrutura mecânica, sistema de controle ou em ambos. Em conformidade com a abordagem, outro modelo de robô é apresentado nesse trabalho. Nessa arquitetura, o robô é acionado por um único atuador elétrico, responsável pelo giro do corpo cilíndrico do robô, que possui ranhuras em sua superfície. Essas ranhuras operam como cames e coordenam a sincronia entre os movimentos dos elos e das patas do dispositivo. Como a sincronia das partes móveis do dispositivo é inteiramente mecânica, essa arquitetura dispensa a existência de um controlador para o adequado funcionamento do robô. A sincronia puramente mecânica dos movimentos do robô gera a vantagem de torná-lo um equipamento robusto, visto que não há a necessidade de um controlador gerenciando o mesmo, e permite que o dispositivo seja exposto até mesmo às áreas mais adversas.

1.1 Objetivos do Trabalho

Objetivo Geral

O objetivo geral desse trabalho consiste no projeto, confecção e análise de um robô do tipo lagarta de um único atuador, destinado à locomoção em tubulações, visando propiciar a facilidade de manutenção e transporte de componentes no interior das mesmas.

Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do trabalho destinados à análise do protótipo seguem:

- Análise cinemática do dispositivo;
- Considerações técnicas no projeto de robôs lagartas;
- Análise experimental do protótipo construído;
- Transporte de carga equivalente a 1,0 kgf;
- Movimento curvilíneo com raio inferior a 1,0 m.

1.2 Estrutura do Trabalho

No Capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica sobre robôs tubulares e suas aplicações; mecanismo do tipo came e seu comportamento dinâmico nas máquinas; cinemática da locomoção de robôs do tipo lagarta; atrito entre partes móveis deslizantes; e, finalmente, a prototipagem rápida de peças via impressora 3D.

No Capítulo 3 são apresentados os materiais e métodos utilizados durante o desenvolvimento do trabalho, tais como descrição da estrutura do robô e suas funcionalidades; definição das dimensões da estrutura do robô e seus componentes; e, por fim, projeção do atuador necessário para o acionamento do robô.

No Capítulo 4 uma análise do comportamento cinemático do robô projetado é realizada, assim como expostas as considerações de projeto levantadas durante a construção do mesmo robô.

No Capítulo 5 são expostos os resultados de ensaios obtidos durante testes de funcionamento do protótipo construído, demonstrando um comparativo entre os resultados previamente estipulados frente aos resultados práticos obtidos.

No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões obtidas através do desenvolvimento do trabalho, bem como as propostas para trabalhos futuros.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Robôs Tubulares

As informações que seguem no texto estão de acordo com o estudo de Pieres, 2016, o qual relata que pesquisas realizadas em relação ao aperfeiçoamento e criação de novas tecnologias de mobilidade intratubulares, assim como o controle e os princípios de acionamento dos mesmos, têm sido desenvolvidas nas últimas décadas com a intenção de melhor capacitar os robôs para operarem em ambientes específicos que são encontrados quando em serviço. Cada máquina tem seu projeto concebido para atender a um conjunto de critérios único, pois o robô construído para trabalhar em uma determinada tubulação não é compatível com outro meio de diferente configuração. Detalhes como mudanças de diâmetro, geometria complexa, ramificações, curvas e tipos de fluido de imersão em tubulações podem fazer com que o deslocamento de um robô através das mesmas seja dificultado ou até mesmo impossibilitado.

Os robôs sem rodas do tipo lagarta têm seu princípio de funcionamento realizado através de seções ou elos que se fixam às paredes internas da tubulação por meio de sistemas de agarre propiciados por suas garras ou patas. Quando um dos elos está preso à parede da tubulação, os demais elos são liberados da condição de agarre à tubulação e são deslocados através de movimentos realizados via atuadores lineares. Alternadamente, passo a passo, os elos são fixados e liberados de maneira sucessiva e, sincronizados aos movimentos de extensão e recolhimento das patas dos mesmos, resultam no deslocamento longitudinal do robô no interior da tubulação, a exemplo ilustrado pela Figura 2.

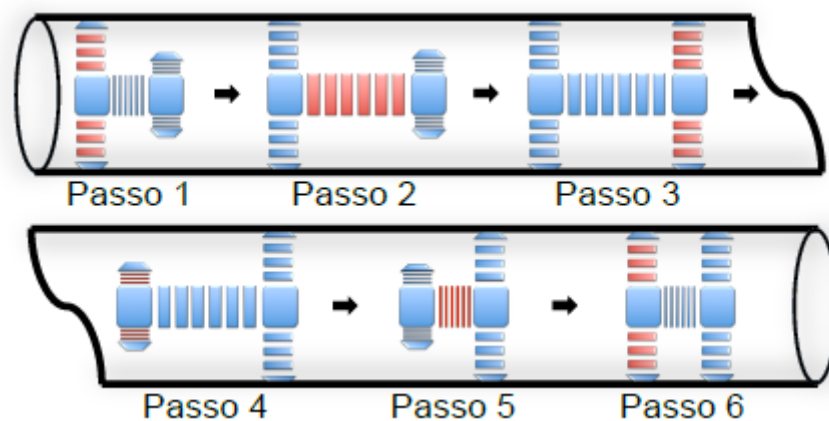


Figura 2: Representação do princípio de deslocamento de robôs do tipo lagarta (Pieres, 2016).

2.2 Mecanismos do Tipo Came

Os cames são acessórios mecânicos destinados a transformar rotações em movimentos retilíneos ou até mesmo em outros movimentos rotatórios de amplitude geralmente limitada. Na Figura 3 apresenta-se o esquema elementar de um mecanismo com came radial. Neste caso, uma haste ou impulsor de gume ou faca está encostado na superfície ou perfil do came. A extremidade da haste está sempre em contato com o perfil do came, definindo deste modo um padrão de movimento da haste em relação à rotação do came (Melo, 2008).

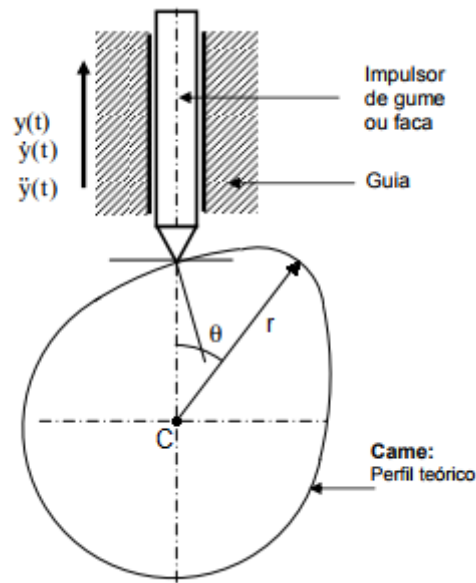


Figura 3: Came radial com acionamento de impulsor do tipo faca ou gume (Melo, 2008).

Suponha-se que o centro de rotação do came seja definido no ponto C , que o eixo da haste passe por esse centro e que r seja uma distância qualquer entre o centro de rotação do came e um ponto de sua superfície. Se for definido que o ponto y refere-se ao ponto da haste em constante contato com a superfície do came e que r é a distância entre o centro de rotação e o ponto da superfície do came sobre o eixo vertical, as equações (1), (2) e (3) representam o movimento do ponto y em relação a rotação do came.

$$y(t) = r(t) = r(\theta(t)) \quad (1)$$

$$\frac{dy(t)}{dt} = \frac{dr(t)}{dt} = \frac{dr(\theta)}{d\theta} \cdot \frac{d\theta(t)}{dt} = \frac{dr(\theta)}{d\theta} \cdot \omega \quad (2)$$

$$\frac{d^2 y(t)}{dt^2} = \frac{d^2 r(t)}{dt^2} = \frac{dr(\theta)}{d\theta} \cdot \left(\frac{d\theta(t)}{dt} \right)^2 + \frac{dr(\theta)}{d\theta} \cdot \frac{d^2 \theta(t)}{dt^2} = \frac{dr(\theta)}{d\theta} \cdot (\omega^2 + \alpha) \quad (3)$$

Onde as variáveis θ , ω e α representam respectivamente o ângulo, a velocidade e a aceleração angulares aplicadas no movimento de rotação do came no sistema.

Outra configuração de cames existente é a denominada came barril ou came cilíndrico com rolo seguidor oscilante. Como mostrado na Figura 4, a haste do seguidor possui um raio R_b e um pivô que gira sobre o ponto P que, em conjunto com o braço, define o plano de referência, sendo este ortogonal ao eixo z de rotação do came. A posição inicial do seguidor em relação ao plano de referência é definida pelos *offsets*, x_0 , $z(0)$, que podem cada um ser tanto positivo quanto negativo. Nota-se que x_0 é uma constante, enquanto z é uma função do ângulo de rotação θ . Dependendo do sentido de rotação do braço $\omega_{\text{braço}}$ em combinação com x_0 , $z(0)$, a movimentação do arco do seguidor pode ou não cruzar o plano de referência ou o eixo do came. Para melhor balanço de forças e ângulo de pressão, boas práticas de projeto sugerem que o movimento do braço deve ser simétrico em relação tanto ao plano de referência quanto ao eixo do came (Norton, 2009).

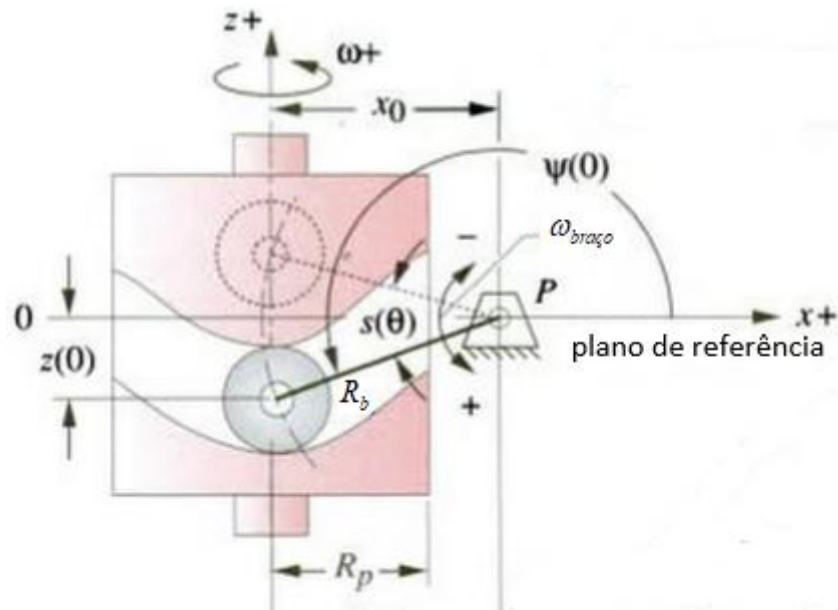


Figura 4: Geometria do came cilíndrico com seguidor (Norton, 2009).

Para o trabalho em questão, é de interesse apenas o movimento oscilatório do seguidor em relação ao eixo z do came. Esse movimento é delimitado e acompanha a curva da ranhura projetada sobre a superfície cilíndrica do came.

2.3 Cinemática de Robôs do Tipo Lagarta

Nessa seção, os diferentes estágios de locomoção do robô do tipo lagarta são descritos, assim como é analisado o comportamento cíclico das posições relativas dos elos entre si. O início de tais análises se inicia pela descrição geral da locomoção de robôs do tipo lagarta.

2.3.1 Descrição Geral da Locomoção de Robôs Tipo Lagarta

É considerado um robô do tipo lagarta de n -elos e denota-se a posição do elo i como $X^{(i)}$ e a distância entre os elos i e j como $X^{(ij)}$, como representado na Figura 5. A Equação (4) mostra a relação entre a distância entre dois elos subsequentes.

$$X^{(ij)} = X^{(j)} - X^{(i)} \quad (4)$$

O ciclo de operação de um robô do tipo lagarta com quatro elos é composto por quatro estágios:

- (1) Afastamento de $|X^{(12)}|$
- (2) Aproximação de $|X^{(12)}|$ e afastamento de $|X^{(23)}|$ simultâneos
- (3) Aproximação de $|X^{(23)}|$ e afastamento de $|X^{(34)}|$ simultâneos
- (4) Aproximação de $|X^{(34)}|$

Após a conclusão do último estágio, o robô se movimentou efetivamente a uma distância L_s e completou um ciclo de operação. Se a ordem de ação dos estágios for invertida, o sentido de deslocamento do robô também é invertido.

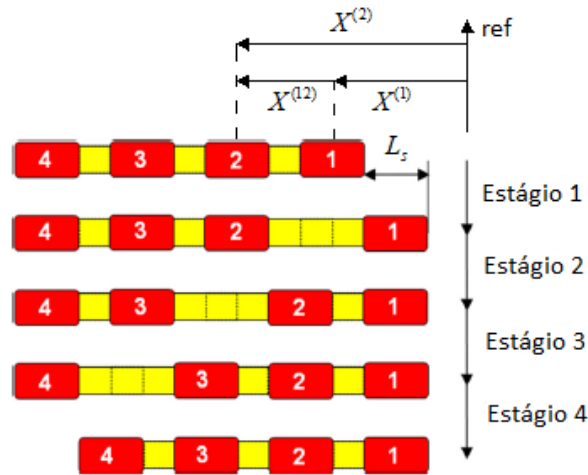


Figura 5: Representação esquemática da locomoção de um robô do tipo lagarta (Zarrouk, 2012).

O passo de locomoção do robô, denominado por L_s , é definido como a diferença entre as distâncias máxima e mínima entre elos vizinhos i e j , conforme relação apresentada na Equação (5) (Zarrouk, 2012).

$$L_s = |X_{\max}^{(ij)}| - |X_{\min}^{(ij)}| \quad (5)$$

2.3.2 Análise da Locomoção de um Robô do Tipo Lagarta

A posição dos elos do robô em função do tempo é representada na Figura 6. A cada ciclo de operação, todo elo se move a uma distância L_s e então permanece parado. O movimento de cada elo é caracterizado pelas etapas de aceleração, velocidade constante e desaceleração. A duração das três etapas de movimento é aproximada pela Equação (6), onde t_{ciclo} é a duração de um ciclo completo de operação. A velocidade média do robô está relacionada à velocidade média de cada elo através da Equação (7).

$$t_m \approx \frac{t_{\text{ciclo}}}{n} \quad (6)$$

$$[V_{\text{robô}}] \approx \frac{[V_{\text{elo}}]}{n} = \frac{L_s}{n \cdot t_m} = \frac{L_s}{t_{\text{ciclo}}} \quad (7)$$

O posicionamento dos elos é quase-cíclico, onde a distância entre as posições do robô em dois ciclos de operação sucessivos é L_s . Além do mais, as posições relativas entre os elos ($X^{(i)} - X^{(j)}$) formam uma função cíclica sobre o tempo. A Figura 6 representa as posições dos elos relativas ao quarto e último elo ($X^{(i)} - X^{(4)}$).

Assumindo elos idênticos e forças de atrito iguais e constantes, cada elo desliza separadamente em um movimento de avanço, pois a força de atrito nesse único elo se movendo é menor que a soma das forças de atrito atuando no restante dos três elos em repouso (Zarrouk, 2012).

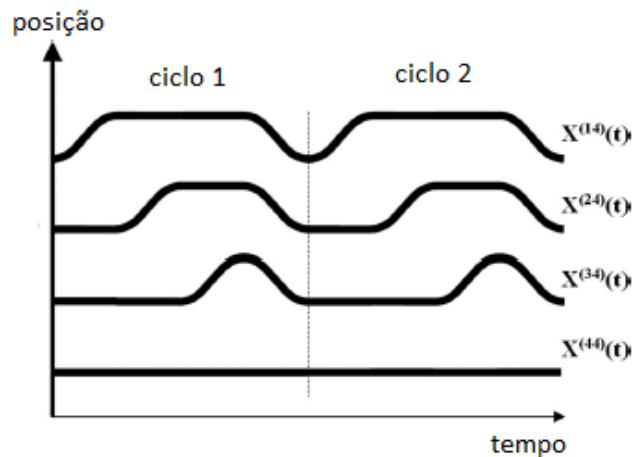


Figura 6: Posições de cada elo relativas ao quarto elo, como funções do tempo (Zarrouk, 2012).

2.3.3 Locomoção de um Robô do Tipo Lagarta 1GDL

Considera-se um simples robô do tipo lagarta de um Grau De Liberdade (GDL) composto por um único atuador principal responsável pelo controle da distância entre os elos e da abertura e fechamento das patas existentes em cada elo. A locomoção desse robô é caracterizada por seis estágios, como mostrado na Figura 7.

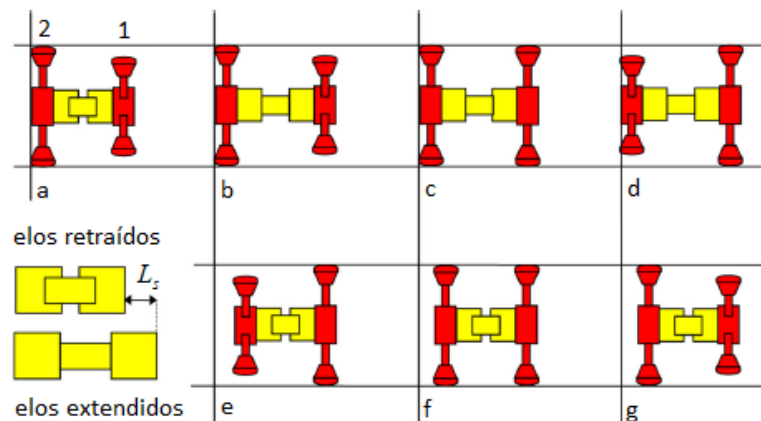


Figura 7: Representação esquemática da locomoção do robô (Zarrouk, 2012).

- De a para b: extensão dos elos
- De b para c: abertura das patas do elo 1
- De c para d: fechamento das patas do elo 2
- De d para e: retração dos elos
- De e para f: abertura das patas do elo 2
- De f para g: fechamento das patas do elo 1

As posições relativas dos elos e a abertura e fechamento das patas em função do tempo estão representadas na Figura 8. A cada ciclo, há uma retração e uma extensão da distância entre os elos, assim como a abertura e fechamento de cada conjunto de patas pertencentes a cada elo. A distância relativa entre os elos e a abertura e fechamento das patas formam um comportamento cíclico em função do tempo (Zarrouk, 2012).

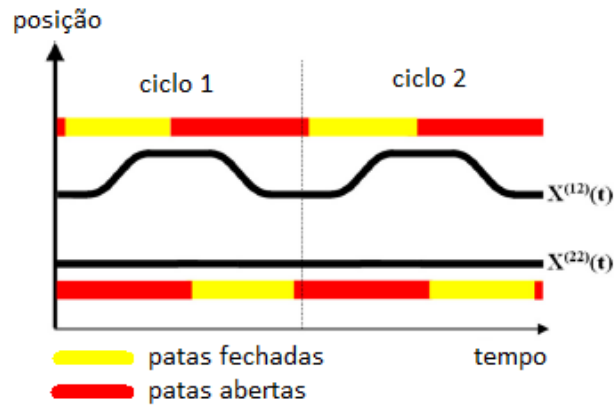


Figura 8: Posição relativa dos elos e abertura e fechamento das patas (Zarrouk, 2012).

2.4 Atrito Entre Partes Móveis Deslizantes

O texto seguinte é baseado no livro de Korondi et al, 2014, o qual informa que o mais simples e provavelmente o mais conhecido modelo de atrito é o chamado modelo de atrito de Coulomb. Apesar de ser uma versão bastante simplificada do fenômeno de atrito, este modelo é amplamente utilizado no âmbito de engenharia quando efeitos dinâmicos não são considerados. A força de atrito de Coulomb F_C é uma força de magnitude constante, que atua em sentido oposto ao do movimento, quando:

$$v(t) \neq 0: F_f(t) = -F_C \operatorname{sgn}(v(t)) \quad (8)$$

$$F_C = \mu F_N \quad (9)$$

Onde, F_N é a força normal contra a superfície e μ é o coeficiente de atrito. μ é obtido por ensaios em determinadas condições. Um dos maiores problemas do modelo de Coulomb é que ele não avalia o fenômeno de atrito na região próxima à velocidade nula e, conseqüentemente, as propriedades de movimento na partida e no transiente de velocidade também deixam de ser avaliadas. Para aplicar o modelo de Coulomb nesses casos, um coeficiente μ_0 é introduzido. No caso de partida de movimento, μ_0 substitui μ na Equação 9 até que o sistema atinja o estado estacionário. Os valores de μ e μ_0 podem ser encontrados em tabelas de estudos físicos ou de engenharia para diferentes materiais submetidos a condições secas ou lubrificadas. Nota-se que, embora esse método seja o meio mais simples e mais rápido de se calcular a força de atrito, ele pode apresentar erros de até 20%. A Figura 9 ilustra graficamente o modelo de atrito de Coulomb simplificado.

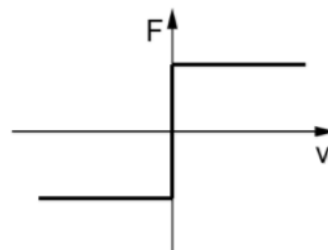


Figura 9: Característica do atrito de Coulomb (Korondi, 2014).

3 Materiais e Métodos

3.1 Estrutura do Robô

Os robôs do tipo lagarta para locomoção no interior de tubulações são caracterizados por serem projetados para operar em tubos de determinada dimensão. Ou seja, o robô é projetado para se locomover em uma tubulação de determinado diâmetro e tolera apenas algumas pequenas variações nesse diâmetro para garantir seu adequado funcionamento. Para cada tubulação de diâmetro interno diferente, um novo robô deve ser projetado. Portanto, para o início da concepção da estrutura do robô, é necessário definir a tubulação na qual o mesmo deverá operar. Para o projeto em questão, definiu-se que a tubulação a ser utilizada possui diâmetro interno de $4,0 \text{ pol}$ (ou $101,6 \text{ mm}$).

Outra característica importante em relação à estrutura do robô do tipo lagarta é em relação à quantidade de patas presentes em cada elo do mesmo. A Figura 1 representa a configuração mais comumente construída desse tipo de mecanismo, a qual é composta por: um corpo, dois elos e quatro patas (duas para cada elo). A quantidade de patas presentes em cada elo influencia diretamente na confecção do came presente no corpo do robô. Esse came é responsável pela sincronia dos movimentos do robô, tanto dos elos (sincronia longitudinal) quanto das patas (sincronia axial), visto que o mesmo é acionado por um único atuador. A alteração da quantidade de patas presentes em cada elo altera a quantidade de ciclos que o came do corpo deverá executar durante uma única rotação. Diferentemente da Figura 1, onde o robô apresenta duas patas em cada elo, definiu-se que nesse projeto o robô apresentará três patas em cada elo. Dois fatores levam à consideração dessa mudança na estrutura do mecanismo:

- Maior aderência à superfície da tubulação: com uma maior quantidade de patas presentes em cada elo do robô, conseqüentemente aumenta-se a área de contato entre o mecanismo e a parede interna da tubulação em qual o mesmo deseja se locomover, propiciando uma maior aderência entre os meios.
- Concentração das forças no centro do corpo do robô: com as três patas dispostas em cada elo defasadas de $2\pi/3 \text{ rad}$, a concentração das forças exercidas pelas mesmas tende ao centro do corpo do robô, mesmo que ocorram pequenas variações na estrutura do mecanismo ou da parede interna da tubulação.

A Figura 7 representa esquematicamente o funcionamento do robô, tanto para o movimento das patas quanto para o movimento dos elos, dentro de cada etapa presente em um ciclo. O gráfico apresentado na Figura 10 ilustra o deslocamento axial das patas e o deslocamento longitudinal dos elos em relação ao centro da circunferência do corpo e ao comprimento médio do mesmo, de acordo com o ângulo de rotação do corpo simbolizado por θ_r .

Como pode-se perceber, o gráfico da Figura 10 mostra apenas os deslocamentos das patas e elos para ângulos de rotação entre 0 e $2\pi/3 \text{ rad}$. Os deslocamentos para ângulos entre $2\pi/3$ e $2\pi \text{ rad}$, que completam o movimento de uma rotação total do corpo, foram omitidos do gráfico por serem apenas uma repetição cíclica dos movimentos representados. Ou seja, uma única rotação do corpo do robô é composta por três ciclos de movimentos sincronizados entre os elos e as patas.

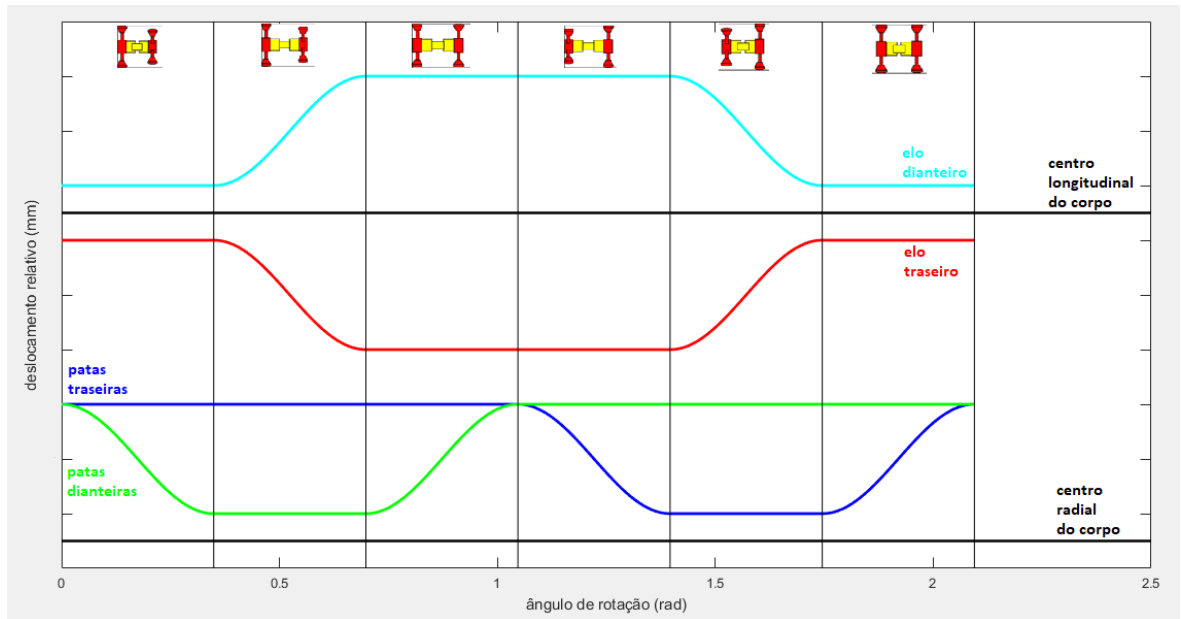


Figura 10: Deslocamentos relativos axiais e longitudinais.

Também se percebe através do gráfico da Figura 10 que os transientes dos movimentos axiais e longitudinais são compostos por curvas de característica senoidal. Cada movimento transiente é executado em um trecho referente à sexta parte do ciclo completo de sincronia dos movimentos das patas e dos elos do robô. Como visto anteriormente, um ciclo de movimento ocorre dentro de uma faixa de rotação do corpo do robô equivalente a $2\pi/3 \text{ rad}$. Portanto, cada movimento transiente deve ocorrer dentro de uma faixa de rotação do corpo correspondente a $2\pi/18 \text{ rad}$, denominada θ_t . Com essas informações, é possível relacionar o raio do corpo do robô com a amplitude da curva senoidal referente aos movimentos transientes axiais. A Figura 11 auxilia na interpretação do problema.

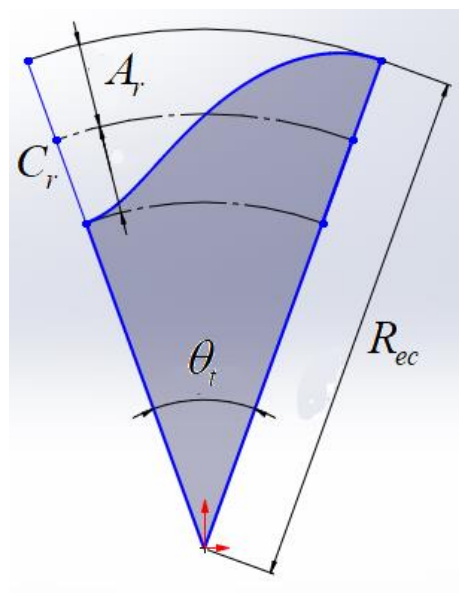


Figura 11: Faixa de ângulo de rotação para cada transiente.

Onde R_{ec} representa o raio do corpo do robô, A_r é a amplitude do movimento senoidal radial executado em cada transiente e C_r é o comprimento do arco médio entre os limites

superior e inferior do movimento radial. O comprimento C_r está relacionado com o raio externo do corpo e a amplitude do movimento senoidal radial conforme a Equação (10).

$$C_r = \frac{2\pi}{18}(R_{ec} - A_r) \quad (10)$$

Para que as propriedades da curva senoidal se mantenham e, principalmente, para que a maior inclinação da curva seja de 45° , é necessário que a relação apresentada na Equação (11) seja respeitada.

$$C_r = \pi A_r \quad (11)$$

Igualando-se as expressões apresentadas nas equações (10) e (11), encontra-se a relação entre o raio externo do corpo do robô e a amplitude do movimento radial, responsável pela abertura e pelo fechamento das patas de cada elo. Essa relação é disposta na Equação (12).

$$A_r = \frac{R_{ec}}{10} \quad (12)$$

Uma análise semelhante à anterior foi realizada para os movimentos longitudinais, responsáveis pelo afastamento e pela aproximação dos elos do robô. A_l é a amplitude do movimento senoidal longitudinal executado em cada transiente e C_l é o comprimento do arco do movimento longitudinal. O comprimento C_l está relacionado com o raio do corpo e conforme a Equação (13).

$$C_l = \frac{2\pi}{18} R_{ec} \quad (13)$$

Novamente, para que as propriedades da curva senoidal se mantenham e, principalmente, para que a maior inclinação da curva seja de 45° , é necessário que a relação apresentada na Equação 14 seja respeitada.

$$C_l = \pi A_l \quad (14)$$

Igualando-se as expressões apresentadas nas equações 13 e 14, é possível encontrar a relação entre o raio do corpo do robô e a amplitude do movimento longitudinal. Essa relação é disposta na Equação (15).

$$A_l = \frac{R_{ec}}{9} \quad (15)$$

Outros parâmetros radiais devem ser considerados para o projeto da estrutura do robô. A Figura 12 ilustra quais são esses parâmetros. As representações de cada um desses parâmetros estão apresentadas na lista que segue:

- R_{ic} - raio interno do corpo do robô
- R_{ec} - raio externo do corpo do robô
- R_{ie} - raio interno do elo do robô
- R_{ee} - raio externo do elo do robô
- A_r - amplitude do movimento senoidal radial

- f - folga entre a parede externa do corpo e a parede interna do elo do robô

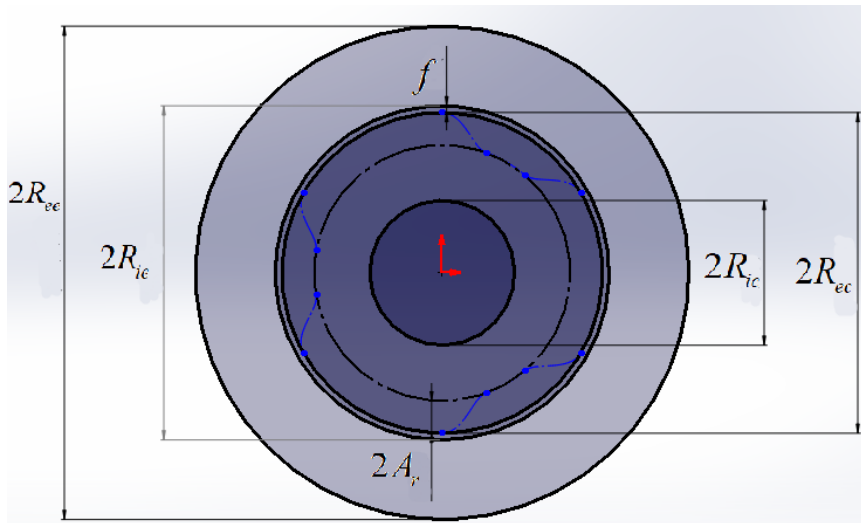


Figura 12: Parâmetros radiais da estrutura do robô.

Definidos os parâmetros radiais da estrutura do robô, a primeira expressão os correlacionando é disposta através da Equação (16).

$$2R_{ee} + 2A_r \leq D_{it} \quad (16)$$

Onde D_{it} indica o diâmetro interno da tubulação em qual deseja-se que o robô se locomova. Além disso, a Equação (16) limita que o diâmetro externo do elo, adicionado à amplitude total do movimento radial (de abertura das patas), não pode ser superior ao diâmetro interno da tubulação. Isso porque, no momento em que o robô está no interior do tubo e é acionado o movimento de abertura das patas, o diâmetro máximo total do mesmo não pode ser superior ao diâmetro interno da tubulação. Tal consideração evita que ocorram restrições no movimento do robô, visto que a tubulação é dita rígida.

Por critério do projetista, três definições foram realizadas, representadas pelas equações (17), (18) e (19):

$$2R_{ee} + 2A_r = 100,0 \text{ mm} \quad (17)$$

$$R_{ee} - R_{ie} = 15,0 \text{ mm} \quad (18)$$

$$f = 0,5 \text{ mm} \quad (19)$$

A Equação (17) define que, no movimento de abertura das patas do robô, o diâmetro externo máximo do mesmo seja igual a 100,0 mm. Como a tubulação possui um diâmetro interno de 101,6 mm, tal definição proporciona uma folga de 1,6 mm entre a parede interna da tubulação e o diâmetro máximo do robô. Como a locomoção do robô no interior do tubo depende da aderência de suas garras à parede interna da tubulação, elastômeros serão acoplados às superfícies das mesmas a fim de propiciar tal aderência sem que seja necessária a redução da folga, importante para as tolerâncias de construção do mecanismo.

A Equação (18) define que a parede do elo do robô tenha uma espessura de 15,0 mm, segundo alguns critérios de construção do mecanismo. Considerou-se que, se essa parede

tivesse uma espessura inferior, a estrutura do elo se tornaria um tanto quanto frágil e poderia vir a quebrar durante os testes ou até mesmo a montagem do protótipo. Porém, se a parede do elo tivesse uma espessura superior, acarretaria na redução do raio externo do corpo do robô e, conseqüentemente, na amplitude do movimento radial (a relação pode ser verificada na Equação (12)), o que limitaria os movimentos do robô e exigiria uma maior precisão na construção do corpo do protótipo. Já a Equação (19) define que exista uma folga de $0,5 \text{ mm}$ entre a superfície externa do corpo e a superfície interna do elo do robô. Tal folga visa permitir que o corpo do robô tenha liberdade para girar no interior do elo sem que ocorra o contato excessivo entre as superfícies.

A Equação (20) define um limite inferior para a espessura da parede do corpo do robô, através de considerações semelhantes às realizadas para a definição da espessura da parede do elo.

$$R_{ec} - R_{ic} - 2A_r = 10,0 \text{ mm} \quad (20)$$

O movimento radial das patas deve ser realizado por cames confeccionados no corpo do robô. Esses cames são responsáveis por acionar impulsores do tipo gume, que impulsionam as patas radialmente para fora ou para dentro, executando os movimentos de abertura ou fechamento das mesmas. Portanto, a espessura da parede do corpo do robô varia com perfil senoidal, de acordo com o movimento que se deseja ser acionado pelo came. A Equação (20) é responsável por definir a espessura mínima da parede do corpo do robô. A Equação (21) correlaciona o raio interno do elo com o raio externo do corpo através da folga definida na Equação (19).

$$R_{ie} = R_{ec} + f \quad (21)$$

Através das equações (17) a (21), adicionadas a Equação (12), é possível calcular os valores dos parâmetros radiais do robô, que estão expostos na Tabela 1.

Tabela 1: Valores dos parâmetros radiais da estrutura do robô.

Parâmetro	Valor (mm)
R_{ic}	13,0
R_{ec}	28,8
R_{ie}	29,3
R_{ee}	44,3
A_r	2,9
f	0,5

Determinados os valores dos parâmetros radiais da estrutura do robô, iniciou-se a análise para determinação dos parâmetros longitudinais do mesmo. A Figura 13 auxilia na identificação dos parâmetros longitudinais a serem dimensionados. As representações de cada um desses parâmetros estão apresentadas na lista que segue:

- L_e - largura do elo do robô
- L_c - comprimento do corpo do robô
- A_l - amplitude do movimento longitudinal dos elos do robô
- f_{elos} - folga entre a proximidade máxima dos elos do robô

A Equação (25) determina que todos os pinos, tanto os responsáveis pelos movimentos radiais quanto os responsáveis pelos movimentos longitudinais, possuem diâmetro externo de $4,0\text{ mm}$. Esse valor foi determinado de acordo com as dimensões encontradas para o corpo do robô. Caso os pinos fossem mais finos, seriam mais frágeis e poderiam não suportar os esforços exigidos pelos movimentos. Em contraponto, se os pinos fossem mais largos, as calhas das cames presentes no corpo do robô também deveriam ser mais largas para receber os pinos, sendo muito amplas em relação ao raio do corpo. Já as equações (26) e (27) determinam que a distância entre o centro dos pinos e as bordas dos elos e a distância entre os centros de dois pinos do mesmo elo sejam de $12,0$ e $14,0\text{ mm}$, respectivamente. Esses valores foram escolhidos a fim de manter sempre uma parede com espessura de ao menos $10,0\text{ mm}$ nos elos, e conseqüentemente, mantê-los rígidos suficientes para suportarem os esforços. Já a Equação (28) determina que a folga entre os elos, mesmo no momento do movimento em que eles se encontram mais próximos, seja de pelo menos $10,0\text{ mm}$, a fim de evitar que os elos colidam. Os valores dos parâmetros longitudinais da estrutura do robô estão dispostos na Tabela 2.

Tabela 2: Valores dos parâmetros longitudinais da estrutura do robô.

Parâmetro	Valor (mm)
L_e	38,0
L_c	98,8
A_l	3,2
f_{elos}	10,0
D_{pinos}	4,0
d_{pb}	12,0
d_{pp}	14,0

Determinados os valores das dimensões dos componentes da estrutura do robô, utilizou-se do auxílio da ferramenta *SolidWorks* (software de CAD) para projeto das peças que compõem a estrutura do robô. Tais projetos podem ser visualizados através das figuras 14 e 15.

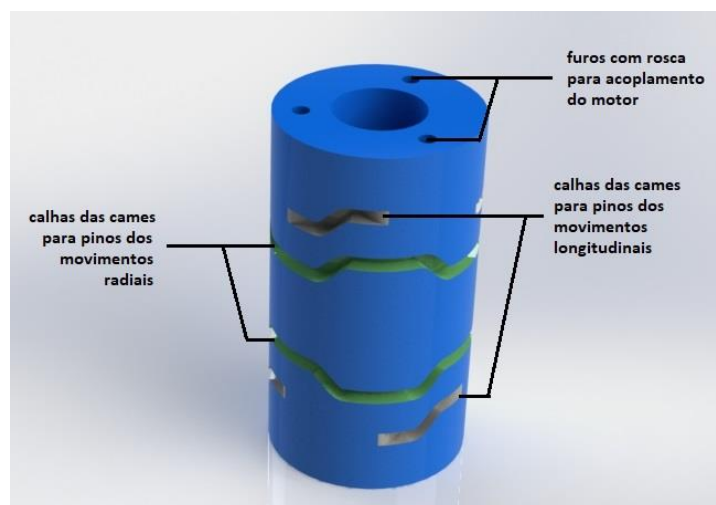


Figura 14: Projeto do corpo do robô.

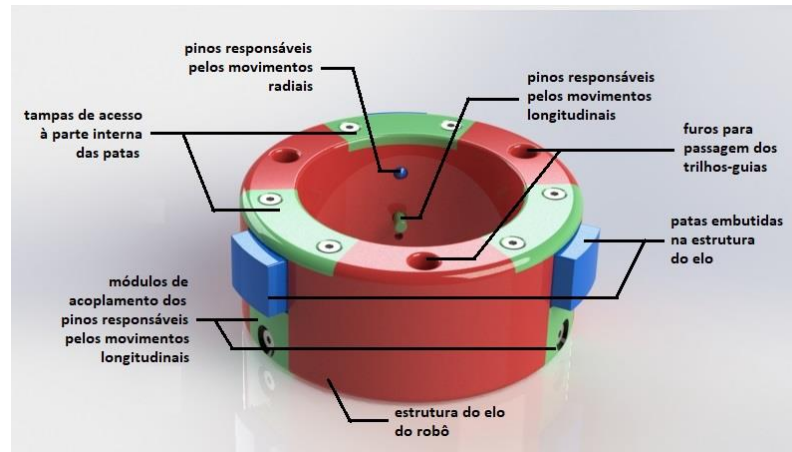


Figura 15: Projeto do elo do robô.

Através da Figura 14, percebe-se que o corpo do robô é composto por um cilindro com dois pares de cames. As cames localizadas mais próximas às extremidades do cilindro são responsáveis pelos movimentos radiais das patas, pois variam com uma curva senoidal o valor do raio do corpo. Já as cames localizadas mais ao centro do cilindro são responsáveis pelos movimentos longitudinais dos elos. O elo do robô, representado pela Figura 15, é composto pela estrutura, pelas patas e os pinos que as movimentam radialmente, os pinos que impulsionam o movimento longitudinal do elo, as tampas que acessam o interior das patas, onde são acopladas molas de retorno, e furos para deslizamento das guias de alinhamento do elo. Considera-se que as molas de retorno apenas exercem forças suficientes para o retorno das patas e as forças normais que as mesmas aplicam sobre a superfície do corpo podem ser desconsideradas.

Os detalhes do projeto do corpo do robô, executado através do *SolidWorks*, pode ser verificado em detalhes no Apêndice A. Já o projeto executado para a estrutura dos elos do robô pode ser verificado em detalhes no Apêndice B. Além de suas estruturas, os elos também são compostos por outros componentes (módulo de acoplamento dos pinos responsáveis pelos movimentos longitudinais, patas embutidas na estrutura com pinos responsáveis pelos movimentos radiais e tampas de acesso à parte interna da pata) os quais têm seus projetos detalhados no Apêndice C.

3.2 Estimativa de Atrito e Determinação do Atuador

Para a determinação das forças atuantes no dispositivo, primeiramente são definidas as orientações dos eixos de referência. A Figura 16 ilustra o robô no interior da tubulação e os respectivos eixos de referência utilizados na análise de forças.



Figura 16: Eixos de referência dos movimentos do robô.

Como pode ser observado na Figura 16, a tubulação é disposta na horizontal, assim como o eixo de referência x . Esse eixo possui a mesma orientação do tubo e é destinado à análise dos movimentos longitudinais do dispositivo. Já o eixo de referência y é perpendicular ao eixo x e é destinado a análise dos movimentos radiais do robô. Para o estudo das forças atuantes no dispositivo, o mesmo foi segmentado em três partes: elo em movimento, corpo e elo agarrado a superfície da tubulação. A análise das forças se inicia pelo elo em movimento. A Figura 17 mostra o diagrama do elo em movimento com as forças atuantes no mesmo consideradas.

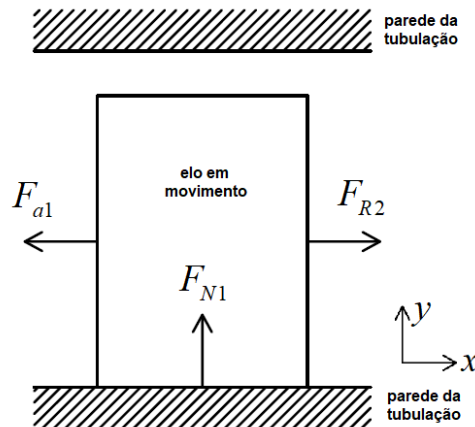


Figura 17: Diagrama de forças do elo em movimento.

Pode-se observar através da Figura 17 que é considerado que o elo em movimento se encontra em contato apenas com a superfície inferior da tubulação. Essa consideração é feita porque, quando com as patas recolhidas, o elo possui diâmetro externo consideravelmente menor que o diâmetro interno da tubulação. De tal maneira, a força peso que atua no elo faz com que o mesmo entre em contato com a superfície inferior da tubulação. As equações (29), (30) e (31) expressam as relações das forças atuantes no elo em movimento.

$$F_{N1} = m_{elo} \cdot g \quad (29)$$

$$F_{a1} = \mu_1 \cdot F_{N1} \quad (30)$$

$$F_{R2} - F_{a1} = m_{elo} \cdot \ddot{x} \quad (31)$$

Onde F_{N1} é a força normal que a parede da tubulação exerce sobre o elo, m_{elo} é a massa do elo que equivale a aproximadamente $0,15 \text{ kg}$ e g é a aceleração da gravidade equivalente a $9,81 \text{ m/s}^2$. Já a força F_{a1} representa a força de atrito exercida sobre o elo pela tubulação durante o movimento e μ_1 indica o coeficiente de atrito existente entre essas duas superfícies. Para a situação de atrito seco entre as superfícies deslizantes, considera-se que μ_1 é aproximadamente $0,6$. A força F_{R2} é referente à reação do corpo do robô, que possui o atuador longitudinal. A força exercida pelo corpo é responsável por impulsionar o elo que não está agarrado à tubulação ao movimento de avanço.

A variável \ddot{x} é referente à aceleração do elo em movimento. Como a amplitude do deslocamento longitudinal do elo e a faixa angular utilizada nos transientes já foram

definidas no projeto geométrico do mesmo (Seção 3.1), a Equação (32) pode ser utilizada para representar o deslocamento relativo do elo a cada ciclo.

$$x = A_l \cdot \text{sen}(9 \cdot \omega \cdot t) \quad (32)$$

Onde ω é a velocidade angular de rotação do corpo com o atuador, executada pelo motor, e t é a variável de tempo. Derivando-se a Equação (34) em relação ao tempo duas vezes, encontra-se a equação da aceleração relativa do elo em movimento, representada pela Equação (33).

$$\ddot{x} = -A_l \cdot 81 \cdot \omega^2 \cdot \text{sen}(9 \cdot \omega \cdot t) \quad (33)$$

Considerando que o valor de A_l encontrado na Seção 3.1 é equivalente a $3,2 \text{ mm}$ e que o motor responsável pelo acionamento do mecanismo terá uma rotação máxima de $100,00 \text{ rpm}$ ($10,47 \text{ rad/s}$), a Equação (33) leva ao resultado de que a aceleração máxima aplicada ao movimento do elo \ddot{x}_{max} será equivalente a $28,41 \text{ m/s}^2$. Substituindo-se os valores calculados nas equações (29), (30) e (31), encontra-se que a força de reação F_{R2} aplicada pelo corpo com o atuador longitudinal sobre o elo em movimento deve ser equivalente a $5,14 \text{ N}$.

Determinada a força que o atuador deve executar sobre o elo em movimento, fez-se uma análise semelhante sobre as forças atuantes no corpo do dispositivo. A Figura 18 mostra o diagrama do corpo do robô com as forças atuantes no mesmo consideradas.

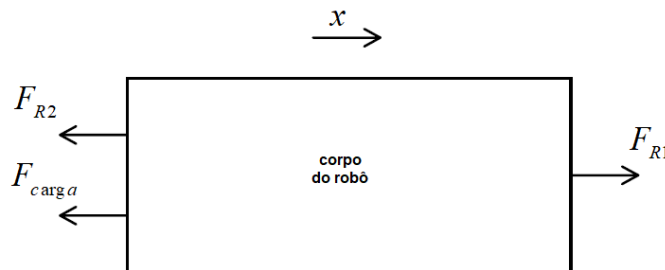


Figura 18: Diagrama de forças no corpo do robô.

As forças consideradas atuantes no corpo do robô possuem a mesma orientação do eixo x . A força denominada F_{carga} refere-se à força de tração executada pela carga a qual o robô deve suportar. Já a força F_{R1} é referente à reação do do elo agarrado à parede da tubulação. A força desse elo é responsável por impulsionar o corpo do robô ao movimento de avanço. A equação de movimento do corpo do dispositivo é então descrita pela Equação (34).

$$F_{R1} - F_{R2} - F_{\text{carga}} = m_{\text{corpo}} \cdot \ddot{x} \quad (34)$$

Onde m_{corpo} é referente à massa do corpo do robô. Sabe-se que a carga que deve ser suportada é de uma força F_{carga} de $1,00 \text{ kgf}$ ($9,81 \text{ N}$) e que massa do corpo do dispositivo m_{corpo} é de aproximadamente $0,70 \text{ kg}$. A amplitude do movimento de avanço do corpo é igual à do elo em movimento. Portanto, sabe-se que a aceleração máxima

aplicada ao corpo \ddot{x}_{\max} será equivalente a $28,41 \text{ m/s}^2$. Substituindo-se esses valores na Equação (34), encontra-se que a força de reação F_{R1} aplicada pelo elo agarrado à parede da tubulação sobre o corpo do robô deve ser equivalente a $34,84 \text{ N}$.

Determinada a força de reação que deve ser executada para movimentar o corpo do robô, deu-se continuidade à análise de forças, desta vez para o elo agarrado à parede da tubulação. A Figura 19 mostra o diagrama do elo agarrado à tubulação com as forças atuantes no mesmo consideradas.

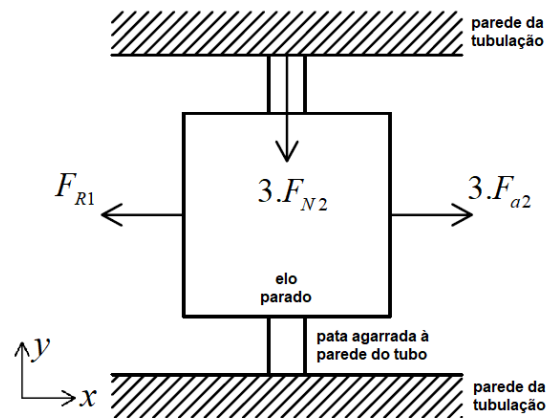


Figura 19: Diagrama de forças do elo agarrado à tubulação.

A força F_{N2} representa a força normal que é exercida pela tubulação sobre cada pata que está agarrada à mesma. Essa é uma força de reação à força que o corpo do robô exerce para impulsionar a pata contra a superfície do tubo. Já a força F_{a2} representa a força de atrito exercida sobre a pata pela tubulação, contrária à força que reagem no corpo para o avanço do mesmo, F_{R1} . As equações (35) e (36) expressam as relações das forças atuantes nos elos agarrados ao tubo.

$$F_{a2} = \mu_2 \cdot F_{N2} \quad (35)$$

$$3 \cdot F_{a2} \geq F_{R1} \quad (36)$$

O coeficiente de atrito existente entre as superfícies das patas e da tubulação é indicado por μ_2 . Para a situação de atrito seco entre as superfícies agarradas, considera-se que μ_2 é aproximadamente 0,9. A Equação (36) mostra que, para que seja possível que o elo agarrado à tubulação impulsiona para o avanço o corpo do robô, é necessário que as forças de atrito atuantes nas patas sejam superiores às forças de reação do corpo. Sabe-se que F_{R1} equivale a $34,84 \text{ N}$. Substituindo-se esses valores nas equações (35) e (36), encontra-se que a força normal F_{N2} atuante sobre cada pata deve ser superior a $12,90 \text{ N}$. A Figura 20 mostra o diagrama das forças das patas exercidas sobre o corpo do robô.

Observa-se que as forças normais F_{N2} aplicadas sobre as patas são convertidas para o corpo do robô como forças de atrito F_{a3} . Essas forças de atrito, por sua vez, são opostas ao movimento de rotação do motor, gerando um torque denominado T_{atrito} oposto ao torque aplicado pelo motor sobre o corpo para a rotação do mesmo, chamado T_{motor} . As

equações (37), (38) e (39) expressam as relações entre forças e torques atuantes sobre o corpo do robô.

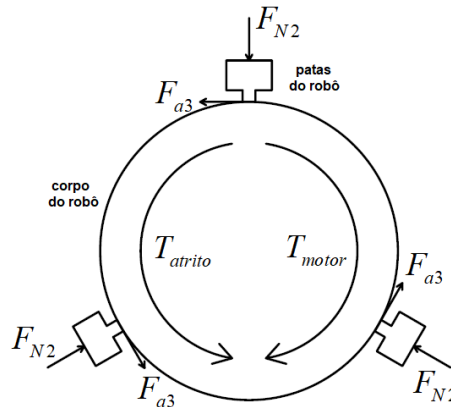


Figura 20: Diagrama de forças e toques atuantes sobre o corpo do robô.

$$T_{motor} > T_{atrito} \quad (37)$$

$$T_{atrito} = 3 \cdot F_{a3} \cdot R_{ec} \quad (38)$$

$$F_{a3} = \mu_3 \cdot F_{N2} \quad (39)$$

Do projeto geométrico do dispositivo sabe-se que o raio externo do corpo R_{ec} é igual a $28,80 \text{ mm}$. Sabe-se também, da análise anterior, que a força normal agindo sobre cada pata F_{N2} é equivalente a $12,90 \text{ N}$. O coeficiente de atrito existente entre as superfícies das patas e do corpo do robô é indicado por μ_3 . Para a situação de atrito seco entre as superfícies deslizantes, considera-se que μ_3 é aproximadamente $0,6$. Substituindo-se esses valores nas equações (37), (38) e (39), encontra-se que, para que o motor seja capaz de vencer o torque de atrito, T_{motor} deve ser superior a $6,82 \text{ kgf.cm}$. Antes de se escolher o motor a ser aplicado no protótipo, definiu-se um coeficiente de segurança CS equivalente a $0,7$ para o torque calculado. A Equação (40) expressa a relação do torque com a aplicação do coeficiente de segurança.

$$T_{motor}' = \frac{T_{motor}}{CS} \quad (40)$$

Através da Equação (40) encontra-se que o motor a ser escolhido deve dispor de um torque mínimo equivalente a $9,74 \text{ kgf.cm}$. Observa-se que os valores estipulados para os coeficientes de atrito consideram que as superfícies em contato estão expostas a atrito seco. Caso o robô atue em ambientes onde o mesmo seja imerso em óleo, o atrito seco não pode mais ser considerado e o atrito viscoso entre as superfícies deve ser analisado. Essa mudança de configuração de atrito pode alterar consideravelmente os coeficientes e, conseqüentemente, as forças de atrito exercidas entre as superfícies. Portanto, para tais situações, o torque necessário no atuador deve ser redimensionado considerando a aplicação de atritos viscosos.

Determinado o torque a ser exercido pelo atuador para executar os movimentos do robô, avaliaram-se os motores disponíveis no mercado que atendem às necessidades de projeto. O motor escolhido foi o modelo de CC (corrente contínua) com caixa de redução

AK555/11.1PF12R83CE-V2 da fabricante Akiyama Motors e a Tabela 3 apresenta as especificações técnicas do mesmo.

Tabela 3: Especificações técnicas do motor.

Parâmetro	Valor
Tensão de operação	6 a 24 V
Tensão nominal	12 V
Rotação sem carga	83 rpm
Corrente sem carga	430 mA
Rotação em máximo rendimento	65,4 rpm
Corrente em máximo rendimento	1,6 A
Torque em máximo rendimento	11.1 kgf.cm
Corrente de partida	6 A
Torque de partida	53 kgf.cm

Para a escolha do modelo do motor, foram considerados os modelos disponíveis no mercado interno que atendem a especificação de desempenho estimada na Equação (40), assim como o custo de aquisição do mesmo. O modelo escolhido tem um custo de aquisição aproximado de R\$ 70,00

3.3 Elementos de Acoplamento Mecânico

Os principais componentes do protótipo (corpo e elos do robô) foram projetados na Seção 3.1. Já na Seção 3.2 foi possível determinar o atuador a ser utilizado para executar os movimentos do robô. Porém, para a construção final do protótipo, são necessários os projetos de demais componentes do mecanismo. Esses elementos são responsáveis pelo acoplamento mecânico de todas as partes do robô. A Figura 21 ilustra o projeto completo do robô, com seus componentes principais e de acoplamento, executado no *SolidWorks*.

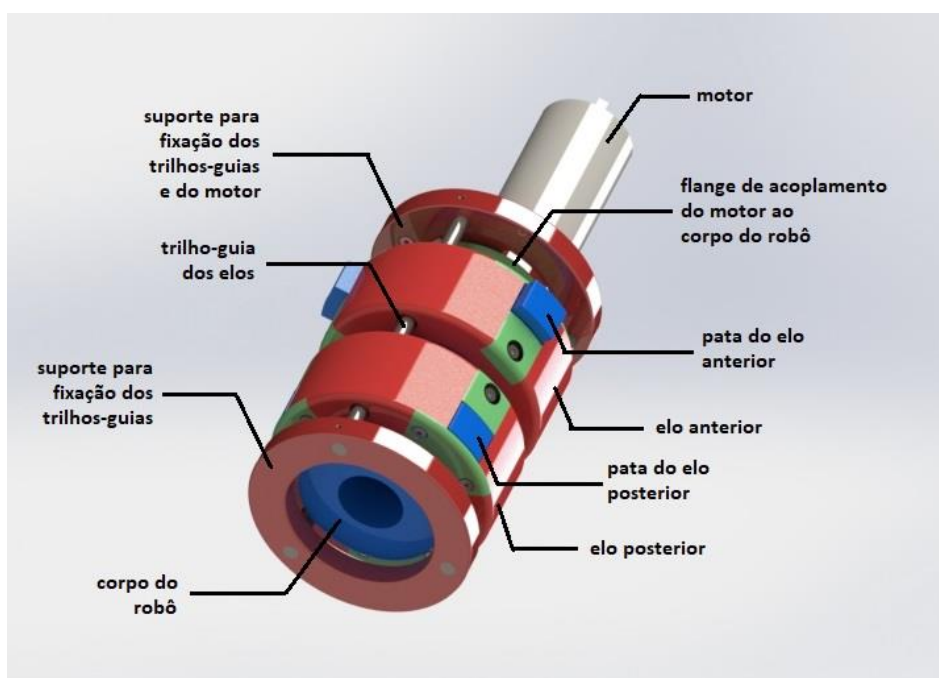


Figura 21: Projeto completo do robô.

As estruturas e as funcionalidades do corpo do robô e dos elos foram explicadas ao longo da Seção 3.1. O motor é o componente responsável por executar a rotação do corpo, que possui cames confeccionadas em sua superfície, as quais impulsionam os pinos responsáveis pelos movimentos de abertura e fechamento das patas do robô. Para que a carcaça do robô permaneça fixa e somente o seu eixo gire, o mesmo é acoplado a um suporte de fixação. Este suporte, por sua vez, é responsável tanto pelo acoplamento da carcaça do motor quanto de umas das extremidades dos trilhos-guias. Estes trilho-guias, como o próprio nome induz, são trilhos responsáveis por guiar o movimento longitudinal dos elos. Uma vez que o corpo permanece em rotação, é necessário que os elos permaneçam radialmente fixos, ou seja, não girem, para que os pinos contidos nos mesmos acompanhem as curvas das cames contidas no corpo do robô. Dessa maneira, restrito o giro dos elos e os pinos dos mesmos acompanhando as calhas presentes no corpo do robô (em rotação), os elos se deslocam apenas longitudinalmente, em movimentos cíclicos de aproximação e afastamento que, sincronizados aos movimentos de abertura e fechamento das garras, permitem a locomoção do robô no interior da tubulação. Nas outras extremidades dos trilhos-guias existe um outro suporte de fixação acoplado, a fim de garantir que os trilhos permaneçam alinhados paralelamente. Para a transmissão do movimento de giro do eixo do motor para o corpo do robô foi confeccionado um flange de acoplamento mecânico. A inserção de tal componente ao mecanismo considera a modularidade do protótipo, assim como uma possível substituição da peça, visto que esse ponto de transmissão de força exige grandes esforços e pode vir a causar danos no componente.

Como salientado na Seção 3.1, os projetos detalhados do corpo do robô, de seus elos e das demais peças que compõem os elos podem ser verificados nos apêndices A, B e C. A Figura 21 mostra que foram necessários os projetos de mais alguns componentes para permitir o acoplamento das peças do mecanismo. Os projetos do suporte responsável pela fixação do motor e dos trilhos-guias e do suporte responsável pela fixação das outras extremidades dos trilhos-guias podem ser verificados em detalhes no Apêndice D. Já os projetos dos trilhos que guiam os elos e do flange que acopla o motor ao corpo do robô estão detalhados no Apêndice E.

As figuras 15 e 21 de projeto permitem visualizar que a união das peças é executada através de parafusos. A Tabela 4 demonstra a quantidade de peças presentes no protótipo, assim como os tipos de parafusos utilizados para a união das mesmas e suas quantidades.

Todos os parafusos indicados na Tabela 4 são sextavados internamente. Os parafusos foram escolhidos de acordo com a aplicabilidade de seus formatos e a ferramenta de acoplamento dos mesmos. Para todos os 33 parafusos contabilizados na Tabela 4, apenas duas ferramentas são necessárias para a instalação dos mesmos, o que agiliza a montagem do protótipo e suas manutenções.

Em relação aos formatos, os parafusos de cabeça cilíndrica foram utilizados nos acoplamentos onde os esforços são elevados, tanto em cargas de tração ou compressão quanto cisalhantes. Já os parafusos de cabeça chata foram utilizados nos acoplamentos onde o alinhamento das peças unidas é crítico. Como o parafuso de cabeça chata possui o perfil da cabeça cônico, ele facilita o alinhamento de peças, desde que o projeto e a execução dos furos tenham sido realizados adequadamente. Os parafusos sem cabeças foram utilizados em acoplamentos onde os esforços são baixos e espaço disponível para a

inclusão do componente é limitado. Como o parafuso sem cabeça é pequeno, sua inserção em uma determinada peça causa um menor prejuízo à estrutura da mesma.

Tabela 4: Relação de peças e parafusos utilizados no protótipo.

Qtd. Peça	Peça	Qtd. Parafuso por peça	Parafuso	Total Parafuso
01	Motor	06	M3x12mm de cabeça cilíndrica	06
01	Suporte trilhos-guias e motor	-	-	-
01	Suporte trilhos-guias	-	-	-
03	Trilho-guia	02	M3x04mm sem cabeça e ponta chata	06
02	Elo	-	-	-
06	Pata com pino de movimento radial	-	-	-
06	Módulo com pino de movimento longitudinal	01	M3X12mm de cabeça chata	06
06	Tampa de acesso ao interior da pata	02	M3x08mm de cabeça chata	12
01	Flange	03	M6x12mm de cabeça cilíndrica	03

3.4 Confeção das Peças em Impressão 3D

A ideia inicial para a confecção das peças do protótipo era a utilização da impressora 3D do LAMECC (Laboratório de Mecânica e Controle) da Escola de Engenharia Mecânica da UFRGS. A expectativa em relação a utilização de tal equipamento se deu visando a redução de custos para confecção das peças do protótipo. A impressora é acessível aos estudantes da Escola de Engenharia para a confecção de peças relacionadas a projetos acadêmicos e os custos de produção se reduzem praticamente à aquisição do material de prototipagem rápida. Porém, a impressora encontrou-se inoperante e foi necessária a busca de alternativas no mercado para a confecção das peças do protótipo.

Depois de finalizados os projetos de todas as peças do protótipo no *SolidWorks*, os arquivos dos mesmos foram enviados a três possíveis fornecedores a cotação da confecção das peças foi solicitada. A lista dos potenciais fornecedores segue:

- LIFE – Laboratório de Inovação e Fabricação da Escola de Engenharia da UFRGS
- PrintUp 3D – *Startup* de soluções em impressão 3D localizada no Prédio Centenário da UFRGS
- Renan – estudante de engenharia que possui impressora 3D de uso pessoal

Os valores solicitados por cada fornecedor para confecção das mesmas peças estão dispostos na Tabela 5.

Tabela 5: Valor orçado pelos fornecedores para confecção das peças.

Fornecedor	Valor Orçado
LIFE	R\$ 2.045,04
PrintUp 3D	R\$ 444,85
Renan	R\$ 180,00

Sabe-se que a discrepância entre os valores orçados por cada fornecedor está atrelada à qualidade dos equipamentos dos mesmos. Impressoras 3D de qualidade elevada proporcionam ótimos acabamentos de superfície e a confecção de peças com formas de alta complexidade. Porém, o custo do próprio equipamento e o da impressão realizada pelo mesmo são também elevados, o que justifica em parte os valores apresentados na Tabela 5. Devido à impossibilidade de arcar com os custos apresentados pelos dois primeiros fornecedores, declinou-se a essas ofertas sem mesmo considerar o acabamento que tais impressões poderiam proporcionar às peças do protótipo.

Consequentemente, o serviço foi solicitado ao único fornecedor restante. O Renan dispõe de uma impressora 3D da marca Tronxy, modelo XI. Foram solicitadas algumas especificações técnicas da impressora relevantes à confecção das peças do protótipo. Segundo o fornecedor, os valores dessas especificações são os seguintes:

- Volume máximo de impressão: 150x150x150 mm
- Resolução da impressão: 0,5 mm
- Velocidade de impressão: 180 mm/s
- Arquivos suportados: STL, OBJ, GCODE, JPG, PNG
- Material consumível: PLA

4 Estudo de Caso

O robô do tipo lagarta é um dispositivo de um único grau de liberdade projetado para se deslocar linearmente no interior de tubulações. No modelo adotado neste projeto, os movimentos do robô são acionados por um único atuador e a sincronia dos mesmos são realizadas através de cames localizadas no corpo do dispositivo. Portanto, a velocidade de deslocamento do robô é unicamente relacionada à velocidade de rotação do atuador, se desprezados os deslizamentos dos componentes de agarre à parede da tubulação. A Equação (41) relaciona a velocidade de deslocamento linear do robô com a velocidade de rotação do motor.

$$v_{robô} = \frac{\omega_{motor}}{2\pi} n_{ciclos} L_s \quad (41)$$

Onde $v_{robô}$ é a velocidade média de deslocamento linear do robô no interior do tubo, ω_{motor} é a velocidade angular da rotação do eixo do motor, n_{ciclos} é o número de ciclos dos movimentos sincronizados do robô executados durante um giro completo do eixo do motor e L_s é a amplitude total da distância relativa entre os elos durante um ciclo de movimento.

A Equação (40) apresenta o torque estipulado exigido pelo motor quando o robô atinge o regime permanente. Já a Tabela 3 indica as especificações técnicas de operação do motor escolhido para atuar no protótipo. Percebe-se que o torque estipulado exigido em regime permanente é equivalente a $9,74 \text{ kgf.cm}$, valor relativamente próximo ao torque propiciado pelo motor em máximo rendimento, $11,1 \text{ kgf.cm}$. Desta análise, conclui-se que, para suportar as cargas estimadas, o motor deverá operar próximo ao seu limite de rendimento. A Tabela 3 ainda indica que a rotação do motor em alto rendimento é equivalente a $65,4 \text{ rpm}$. Logo, assume-se que o motor operará em regime permanente a uma rotação aproximada de $70,0 \text{ rpm}$, ou $7,3 \text{ rad/s}$.

Durante a confecção do projeto da estrutura também definiu-se que o número de ciclos dos movimentos sincronizados do robô executados durante um giro completo do eixo do motor (n_{ciclos}) é equivalente a 3. Este valor indica o número de patas dispostas em cada elo do robô e, conseqüentemente, o número de ciclos que as cames de sincronia apresenta ao longo da circunferência do corpo. Também durante a confecção do projeto da estrutura identificou-se que a amplitude total do movimento relativo entre os elos é equivalente a $12,8 \text{ mm}$, valor que determina o passo de deslocamento do robô no interior do tubo.

Substituindo-se os valores determinados na Equação (41), encontra-se o valor calculado para a velocidade média de deslocamento linear do robô.

$$v_{robô} = 44,8 \text{ mm/s} \text{ ou } v_{robô} = 268,8 \text{ cm/min} \quad (42)$$

5 Resultados

O objetivo geral desse trabalho baseou-se no projeto, confecção e análise de um robô do tipo lagarta de um único atuador, destinado à locomoção em tubulações, visando propiciar a facilidade de manutenção e transporte de componentes no interior das mesmas. O projeto foi executado e o protótipo foi construído, permitindo a análise desejada. A Figura 22 mostra o protótipo montado.



Figura 22: Protótipo do robô montado.

Já os objetivos específicos destinaram-se em: realizar a análise cinemática do dispositivo, levantar as considerações técnicas pertinentes ao projeto de robôs lagartas, executar a confecção do protótipo e realizar experimentos, buscando com que o protótipo seja capaz de transportar cargas equivalentes a 1,0 kgf e realizar curvas com raios inferiores a 1,0 m. A análise cinemática do robô foi concluída com a definição da equação da velocidade média de deslocamento linear do dispositivo, visto que o mesmo possui apenas um grau de liberdade. A validação da equação da velocidade do dispositivo foi feita a partir do confronto entre o valor estipulado teórico e o valor obtido em teste prático. A Equação (42) indica que o valor estipulado teórico para a velocidade média do robô é equivalente a 44,8 mm/s.

Embora o protótipo tenha apresentado muitos problemas em sua concepção original, tais como saliências na superfície e espessura fina das paredes dos componentes, ocasionados pela baixa qualidade da impressão 3D, depois de muitos ajustes manuais no dispositivo, alguns testes puderam ser realizados, permitindo a análise prática do mecanismo. Testes práticos demonstraram que, para as mesmas condições impostas à obtenção da equação da velocidade estipulada, o protótipo apresentou uma velocidade média de deslocamento em regime permanente aproximada a 42,0 mm/s. O teste de velocidade foi realizado com o auxílio do fio de nylon que acopla a carga à estrutura do robô, como mostrado na Figura 23. Marcou-se a posição inicial do fio coincidente com a extremidade da tubulação, acionou-se o motor por dez segundos e marcou-se novamente o fio. Desprezando-se a deformação do fio, a distância deslocada pelo robô é equivalente à distância entre os dois pontos marcados no fio. De tal maneira, a velocidade de deslocamento de robô pode ser calculada dividindo-se a distância percorrida pelo tempo de acionamento do mesmo. A diferença entre os resultados teóricos e práticos representa 6,3% de erro, que pode ser atribuído a efeitos desconsiderados em projeto, como o deslizamento das patas agarradas à superfície da tubulação.

Entre os períodos de manutenção do robô, solicitados a cada operação, também foi possível realizar um teste prático em relação à capacidade de carga e outro teste de capacidade de movimento curvilíneo do dispositivo. Para o teste de capacidade de carga, foi acoplada na extremidade do robô uma força aproximada a 1,0 kgf e acompanhado o comportamento do robô no interior da tubulação. Essa carga foi acoplada através de um fio de nylon fixo à carcaça do motor com o auxílio de uma abraçadeira plástica. Foi, então, suspensa no ar por esse fio uma massa de aproximadamente 1,0 kg, resultando em uma força de tração no fio de 1,0 kgf a qual representa a carga. Nessa situação, o robô manteve-se deslocando no interior do tubo com velocidade aproximada de 41,0 mm/s, comprovando que o dispositivo tem capacidade de transportar cargas de 1,0 kgf. Não foram realizados testes para identificar o limite máximo de carga do dispositivo para evitar que a estrutura do mesmo fosse danificada. A Figura 23 mostra a estrutura montada para o teste.



Figura 23: Teste de capacidade de carga.

Para confecção da tubulação, foi utilizada uma mangueira flexível de PVC construída com estrutura reforçada por espiral rígido. Essa mangueira foi escolhida porque a flexibilidade de seu material permite que a tubulação seja disposta em uma variedade de raios de curvatura. Embora seja possível dispor a mangueira curvada, o reforço rígido de sua estrutura garante que seu diâmetro interno permaneça em seu valor original equivalente a 4,0 pol. Esse aspecto é importante para o teste de capacidade de movimento curvilíneo do robô que será explicado posteriormente. Observa-se que, embora a superfície externa do tubo seja de aspecto rugoso, devido ao reforço por espirais, a superfície interna da tubulação é totalmente lisa.

Como pode ser observado na Figura 23, para o teste de capacidade de carga, a tubulação foi disposta linearmente sobre uma superfície plana. À extremidade do robô foi

preso um fio de nylon e a esse fio foi presa uma massa aproximada de 1,0 kg suspensa no ar. O robô é então acomodado no interior da tubulação e acionado para que se desloque. Desprezando-se a força de atrito do fio de nylon com a borda do tubo e considerando que a aceleração da gravidade seja de aproximadamente $9,8 \text{ m/s}^2$, essa configuração resulta em uma carga aproximada de 9,8 N (ou 1,0 kgf) na extremidade do robô.

Para o teste do raio de curvatura suportado pelo robô foi utilizado um método empírico. Construiu-se uma tubulação com raio de curvatura equivalente a 1000 mm e analisou-se a capacidade do robô de se locomover no interior na mesma. Validada essa capacidade, o raio da tubulação era decrescido gradativamente e um novo ensaio era realizado. Através de testes sucessivos, identificou-se que a capacidade de curvatura do movimento do robô é equivalente a 700 mm. A Figura 24 ilustra a estrutura montada para o teste de capacidade de movimento curvilíneo do robô. Percebe-se que a estrutura montada para o teste de capacidade de movimento curvilíneo é semelhante à estrutura do teste de capacidade de carga, à diferença de que, desta vez, a tubulação foi disposta curvada, como observado na Figura 24.



Figura 24: Teste de capacidade de movimento curvilíneo.

Embora o valor encontrado para a capacidade de curvatura do movimento do robô esteja dentro dos critérios de projeto inicialmente estimados, ainda se define como elevado o raio de curvatura em relação ao raio do próprio dispositivo. Constatou-se que a dificuldade do dispositivo em executar movimentos curvilíneos é relativa à baixa variação do seu diâmetro máximo durante o ciclo de movimento de suas patas. Ou seja, quando um elo está com suas patas completamente recolhidas, o diâmetro do dispositivo é equivalente a 88,6 mm; e, quando o elo está com suas patas completamente expostas, o diâmetro do dispositivo passa a ser equivalente a 100,2 mm. Essa variação de apenas 13% no diâmetro do robô dificulta que ele execute movimentos curvilíneos mais acentuados e está diretamente relacionada à estrutura do modelo do robô projetado.

6 Conclusões e Trabalhos Futuros

A baixa resolução da impressora utilizada para a confecção das peças prejudicou consideravelmente a construção do protótipo. O corpo do robô foi projetado com curvas complexas para as cames responsáveis pela sincronia dos movimentos do robô. Como essas cames são cruciais para o adequado funcionamento do dispositivo, elas exigem alta resolução e ótimo acabamento superficial. Como a única opção de impressão acessível durante a execução do projeto não atendeu a esses requisitos, diversos ajustes finos, tais como reforços de partes da estrutura com resina epóxi e acabamento de superfície com desbaste manual com lixa, tiveram que ser executados para que o protótipo pudesse operar, demandando demasiado tempo para a construção do robô.

Além dos problemas apresentados acima, faz-se outra ressalva em relação a utilização da impressão 3D para a confecção de dispositivos desse modelo. O modelo de robô adotado baseia-se na sincronia de suas partes móveis única e exclusivamente através de cames, o que acarreta em diversos pontos de atrito durante o seu funcionamento. Porém, os materiais comumente utilizados em impressão 3D, como ABS e PLA, possuem pontos de fusão relativamente baixos. Como as forças de atrito dissipam-se na forma de calor entre as peças em contato no mecanismo, a temperatura do mesmo eleva-se e as peças confeccionadas pela impressora 3D tendem a se aproximar do ponto de fusão do seu material e, conseqüentemente, deformar a estrutura dos mecanismos. Visto isso, o período de cada ciclo de funcionamento do robô deve ser curto, a fim de evitar com que o mesmo sobreaqueça e se deforme.

Apesar das ressalvas apontadas, identificou-se que o modelo de robô é funcional, embora tenha muitas limitações em sua operação. Como trabalho futuro, indica-se que sejam estudados materiais e ferramentas alternativas para a confecção dos componentes do robô, visando materiais que sejam mais resistentes a situações de atrito e ferramentas que permitam a moldagem desses materiais, mesmo para superfícies complexas como as apresentadas durante o trabalho, propiciando boa resolução e acabamento de superfície.

7 Referências

ALVES, J. L.; NETO, R. J.; **A Prototipagem Rápida na Indústria Nacional**, Artigo, FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto, Porto, Portugal, 2015.

BRENDLER, C. F.; JÚNIOR, W. K.; POHLMANN, M.; ROSSI, W. S.; TEIXEIRA, F. G.; **Drawing, virtual modeling and 3D print in the production of didactic models for the teaching-learning of visually impaired students: case study of nanostructured systems**, International Journal of Education and Research, UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

COSTA, A.; RESENDE, J.; CEDRO, M.; FERNANDES, V.; **Robô de Inspeção Tubular Protótipo PIC – Pipeline Inspection Crawler**, Artigo, UNIFACS – Universidade Salvador, Salvador, 2008.

KORONDI, P.; HALAS, J.; SAMU, K.; BOJTOS, A.; TAMÁS, P.; **Robot Applications**, First Edition, BME MOGI, 2014.

MELO, F. Q.; CARNEIRO, J.; **Cinemática e Dinâmica de Cames**, Apostila, Universidade de Minho, Braga, Portugal, 2008.

NORTON, R. L.; **Cam Design and Manufacturing Handbook**, Second Edition, Industrial Press, 2009.

PIERES, A.; **Estudo Sobre Sistema de Locomoção de um Equipamento de Inspeção Interna de Tubulação**, Monografia, UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

SAGA, N.; SETO, T.; TAKANASHI, H.; SAITO, N.; **Development of a Peristaltic Crawling Robot Using Planar Link Mechanisms**, Academic Article, IEEJ – Institute of Electrical Engineers of Japan, 2008.

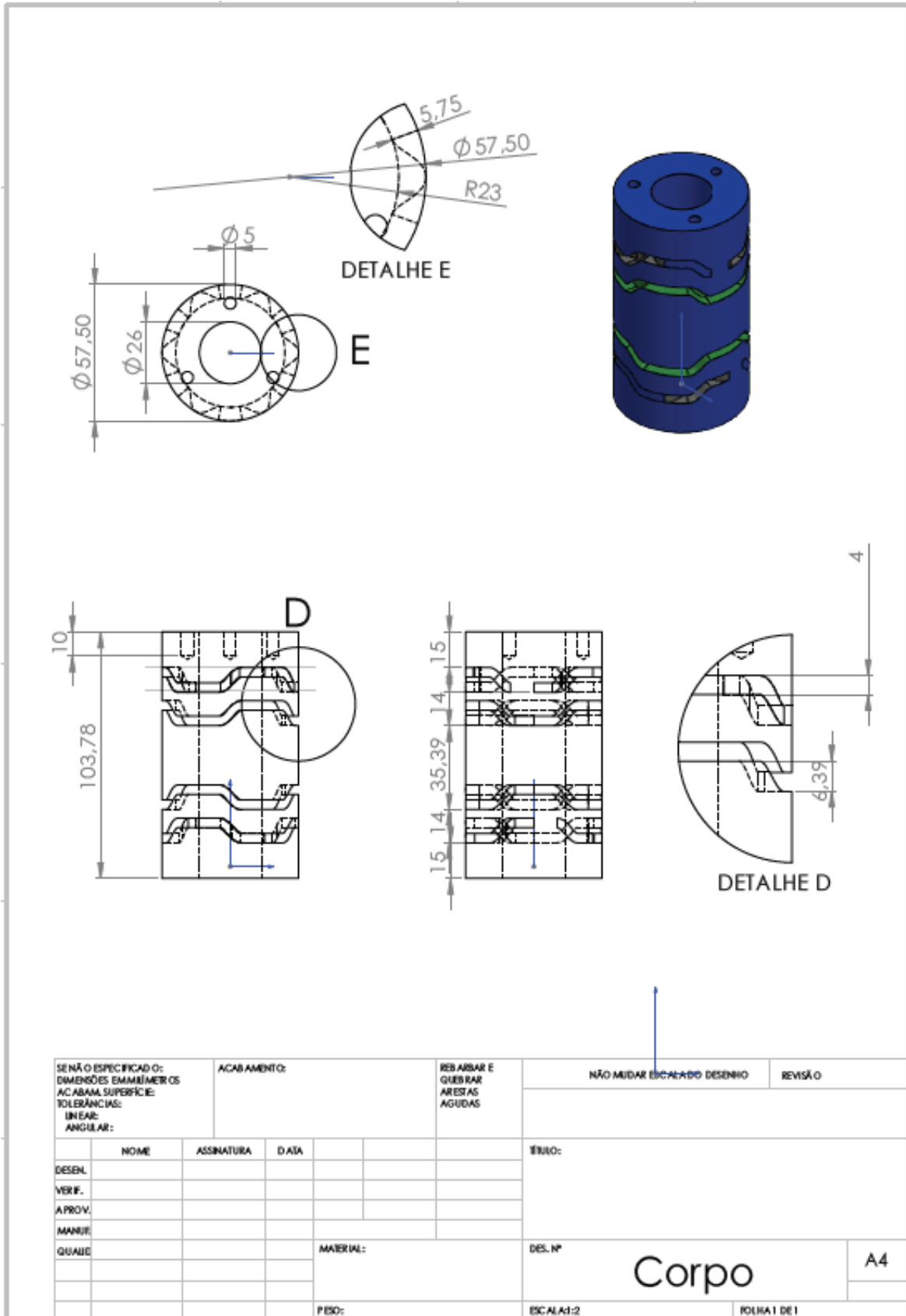
SHARMA, P.; **Designing a Real Time Embedded Controller Using data Acquisition System for a DC Motor Speed Control**, Thesis, National Institute of Technology Rourkela, Rourkela, India.

SHIGLEY, M.; **Mechanical Engineering Design**, Eighth Edition, McGraw-Hill, 2006.

ZARROUK, D.; SHORAM, M.; **Analysis and Design of One Degree of Freedom Worm Robots for Locomotion on Rigid and Compliant Terrain**, Journal of Mechanical Design, Technion – Israel Institute of Technology, Haifa, Israel, 2012.

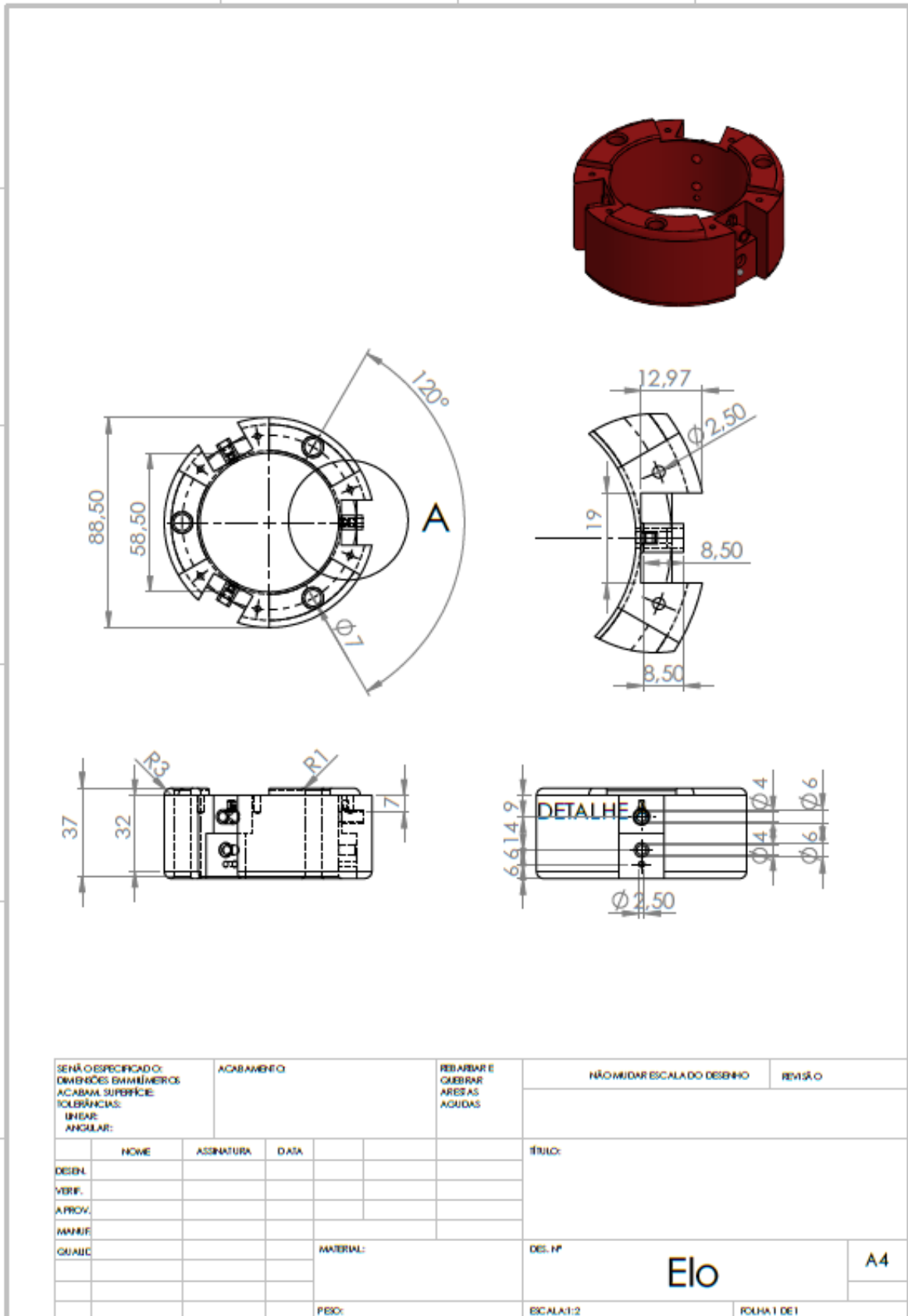
Apêndice A

A imagem abaixo mostra detalhes do projeto do corpo do robô executado no SolidWorks.



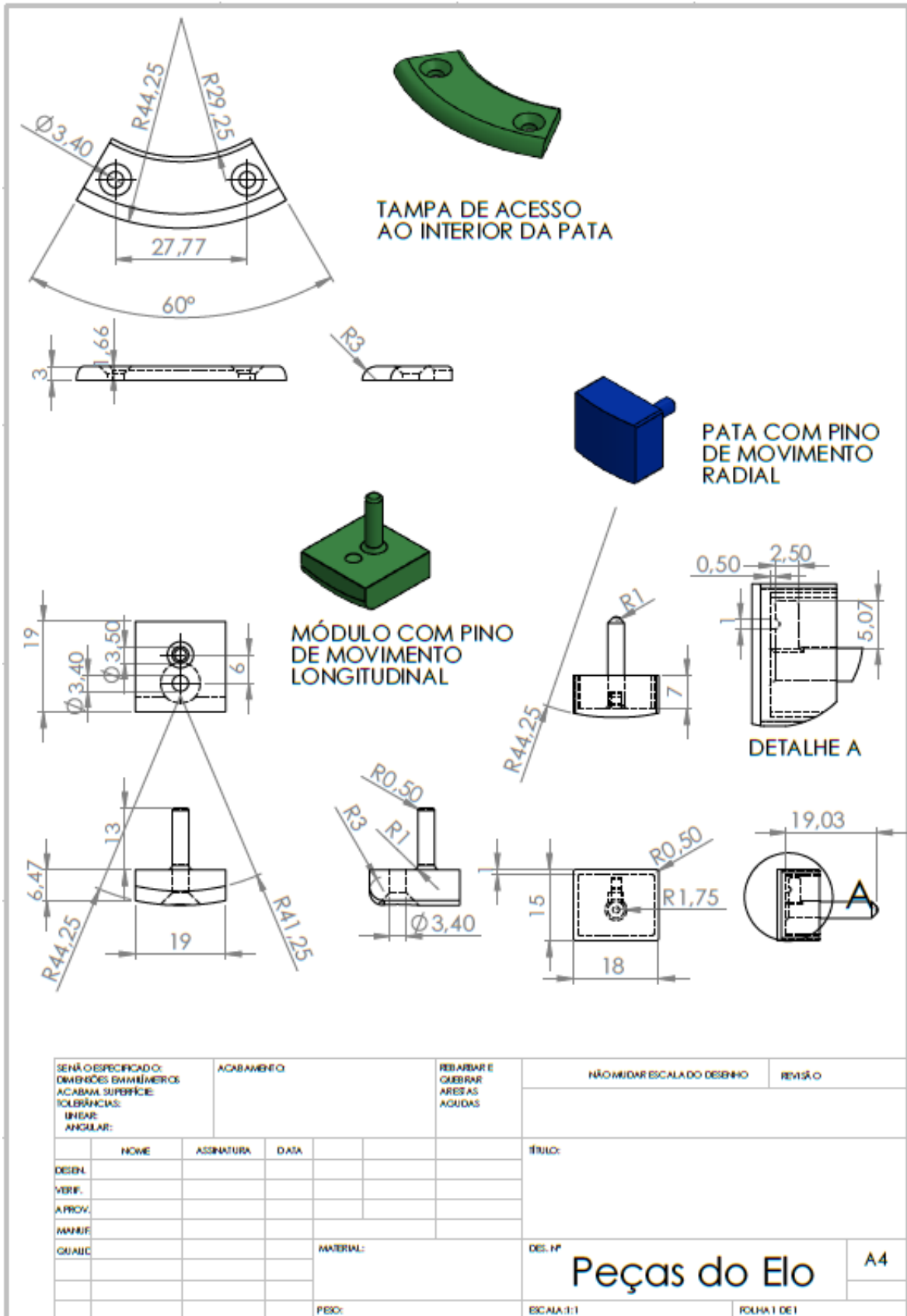
Apêndice B

A imagem abaixo mostra detalhes do projeto dos elos do robô executado no SolidWorks.



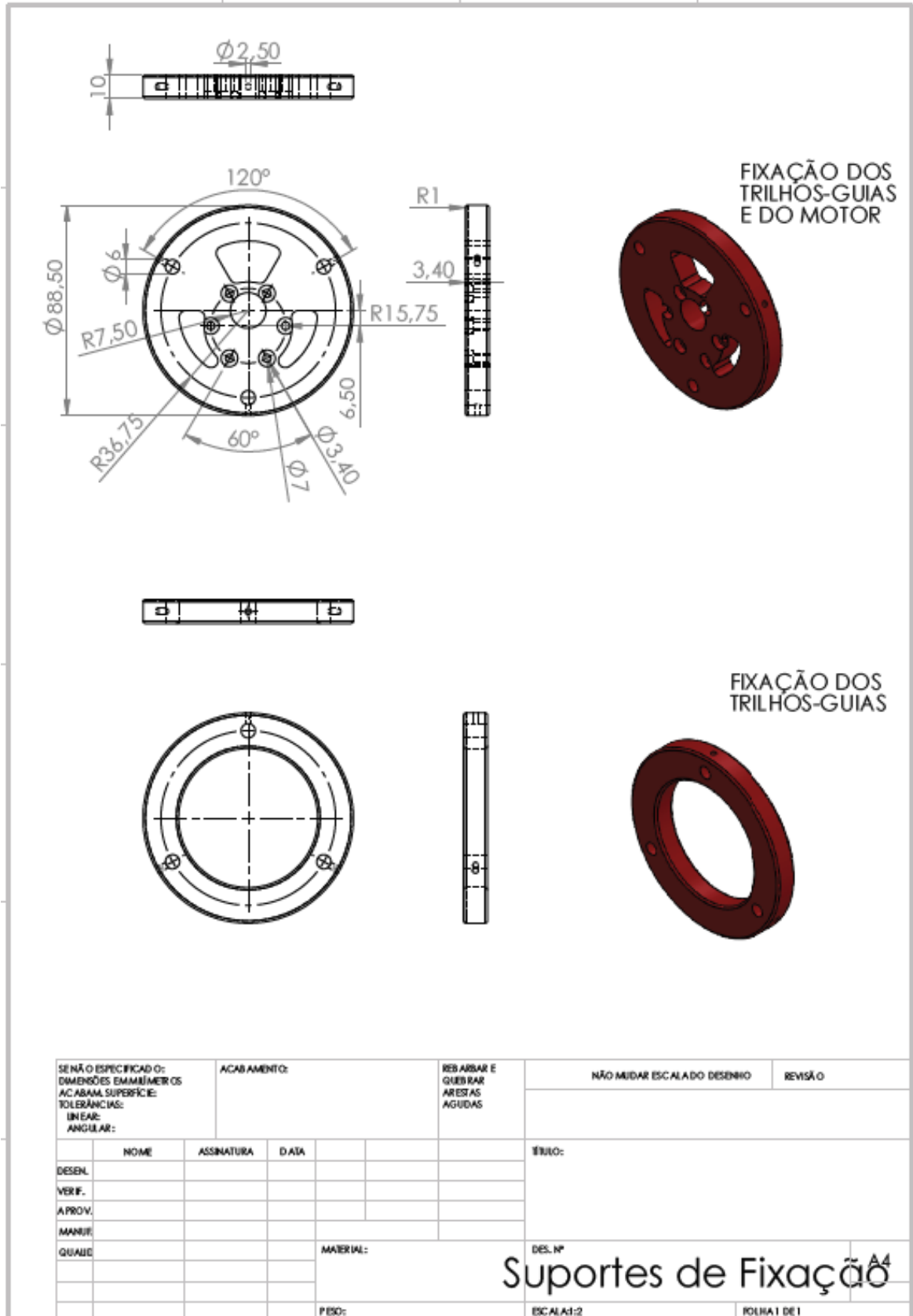
Apêndice C

A imagem abaixo mostra detalhes dos projetos das peças componentes dos elos do robô executados no SolidWorks.



Apêndice D

A imagem abaixo mostra detalhes dos projetos das peças responsáveis pelo suporte do motor e dos trilhos-guias do robô executados no *SolidWorks*.



Apêndice E

A imagem abaixo mostra detalhes dos projetos dos trilhos que guiam os elos do robô e o flange que transmite o movimento do motor executados no *SolidWorks*.

