

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

VICTOR RENAN BOLZON

**MODELAGEM DINÂMICA E CONTROLE DE UM MANIPULADOR
PARALELO DE SEIS GRAUS DE LIBERDADE**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO
2016

VICTOR RENAN BOLZON

**MODELAGEM DINÂMICA E CONTROLE DE UM MANIPULADOR
PARALELO DE SEIS GRAUS DE LIBERDADE**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso, do Curso Superior de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR.

Orientador: Fabian Andres Lara Molina

CORNÉLIO PROCÓPIO

2016

Foco, Força e Fé.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus que iluminou o meu caminho durante esta caminhada.

Depois a minha família, em especial aos meus pais João Roberto e Lisete, e minha irmã Isabela, pelo apoio, dedicação, amor, carinho e compreensão, sem vocês nada disso seria possível.

A minha namorada, Ana Carolina, sempre me dando força, coragem, incentivo e principalmente com paciência para enfrentar os problemas.

Ao professor Dr. Fabian, pela paciência na orientação, amizade e incentivo que tornaram possível a conclusão deste trabalho. E juntamente com o professor Dr. Edson, foram fundamentais para a escolha da área de pesquisa, o que me motivou a continuar os estudos e os trabalhos.

Erik, Daniel, Luiz Gustavo e Bertola muito obrigada pelas trocas acadêmicas, por todas as ajudas e pela companhia.

Aos meus amigos de república, Ricardo, Jonatas, Jhonata, Adriano, Leandro e Guilherme pelo companheirismo e amizade.

Aos meus amigos de longa data Mateus T., Eduardo e Matheus Z. pela parceria de sempre.

RESUMO

BOLZON, V. R. *Modelagem Dinâmica e Controle de um Manipulador Paralelo de Seis Graus de Liberdade*. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2016.

Este trabalho visa estudar a cinemática e a dinâmica da Plataforma de Stewart-Gough baseado no modelo dinâmico completo e analisar seu comportamento mediante simulações computacionais. Conseqüentemente, baseado na modelagem e simulação projeta-se o sistema de controle nesse manipulador paralelo que tem seis graus de liberdade. O Controlador utilizado no controle de posição foi projetado utilizando o Regulador Linear Quadrático (LQR), juntamente com o Controle de Torque Computado (CTC), que são aplicados com o objetivo de minimizar o erro de rastreamento de trajetórias no espaço das juntas. Adicionalmente, um controlador Proporcional derivativo (PD) com controle de torque computado foi implementado para avaliar a precisão do rastreamento de trajetória em comparação com o LQR. As simulações foram implementadas no software Matlab/Simulink[®] para avaliar o desempenho dos controladores.

Palavras-chaves: Plataforma de Stewart-Gough, Modelagem Dinâmica, Controle de posição, Regulador Linear Quadrático, Controle de Torque Computado.

ABSTRACT

BOLZON, V. R. *Dynamic Model and control of a completely parallel manipulator with six degrees of freedom*. BSc. Thesis, Federal Technological University of Paraná. Cornélio Procópio, 2016.

This Bachelor Thesis aims at the study the kinematics and dynamics of the Stewart-Gough Platform based on the full dynamic model and analyze the response through computational simulations. Consequently, based on the dynamic model and the simulations, the control project of this parallel manipulator with six degrees of freedom will be executed. The controller used for the position control are designed with the techniques of Linear Quadratic Regulator(LQR) and Computed Torque Control (CTC), which are applied in order to minimize the trajectory tracking error in the workspace. In addition, a proportional derivative controller (PD) with Computed Torque Control torque was projected to evaluate the accuracy of the trajectory tracking compared to the LQR. The simulations has been implemented by using the Matlab/Simulink[®] software to evaluate the performance of the control techniques.

Key-words: Stewart-Gough Platform, Dynamic Modeling, Position Control, Linear Quadratic Regulator, Computed Torque Control.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	– Manipulador Paralelo 3-PRC.	12
Figura 2	– Modelo do manipulador de 3 gdl's no Adams.....	13
Figura 3	– Componentes de um sistema robótico.....	15
Figura 4	– Manipulador em série (esquerda) e o manipulador paralelo (direita).	16
Figura 5	– O robô de Delta e uma versão industrial, o FlexPicker IRB 340.	18
Figura 6	– Protótipo desenvolvido por Grosselin.....	18
Figura 7	– Robôs de 4 Graus de Liberdade.....	19
Figura 8	– Robôs de 5 Graus de Liberdade.....	20
Figura 9	– Robôs de 6 Graus de Liberdade.	20
Figura 10	– Robôs utilizados para fins de entreterimento.	22
Figura 11	– Robôs utilizados para em aplicações na medicina.	22
Figura 12	– Plataforma projetada por Gough em 1954.	24
Figura 13	– Plataforma de projetada por Stewart.	25
Figura 14	– Plataforma de Stewart-Gough.	25
Figura 15	– Plataforma de Stewat-Gough 6-SPS.	26
Figura 16	– Plataforma de Stewat-Gough 6-UPS.	26
Figura 17	– Perna da Plataforma de Stewart-Gough.	28
Figura 18	– Controle Torque Computado e PD.....	32
Figura 19	– Modelo implementado no Simulink®.....	35
Figura 20	– Malha implementada no Simulink®.....	36
Figura 21	– Plataforma na posição inicial.....	36
Figura 22	– Plataforma após a aplicação das forças em forma de pulso.....	37
Figura 23	– Forças aplicadas em cada um dos seis atuadores.....	37
Figura 24	– Gráfico do deslocamento de cada perna.....	38
Figura 25	– Gráfico velocidade das pernas durante a aplicação das forças.....	38
Figura 26	– Gráfico do deslocamento lineares e angulares do CG do manipulador durante a aplicação das forças.....	39
Figura 27	– Gráfico das velocidades lineares e angulares do manipulador durante a aplicação das forças.....	40
Figura 28	– Rastreamento da trajetória.....	41
Figura 29	– Erro junta para o rastreamento de uma trajetória circular para o controlador PD (esquerda) e o LQR (direita).	42
Figura 30	– Rastreamento de uma trajetória utilizando os controladores PD e LQR, respectivamente.	42
Figura 31	– Regulador de uma perturbação (PD e LQR).....	43

SUMÁRIO

Lista de ilustrações	6
1 INTRODUÇÃO	8
1.1 JUSTIFICATIVAS	8
1.2 OBJETIVOS	9
1.2.1 Objetivo Geral	9
1.2.2 Objetivos Específicos	9
1.3 METODOLOGIA	9
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	10
2 REVISÃO DA LITERATURA	11
2.1 MODELAGEM DE MANIPULADORES PARALELOS	11
2.2 SIMULAÇÕES DE ROBÔS PARALELOS	12
2.3 CONTROLE	13
2.4 PRESENTE TRABALHO	14
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
3.1 SISTEMAS ROBÓTICOS.....	15
3.1.0.1 Características dos manipuladores em série e paralelo	16
3.2 CLASSIFICAÇÃO DOS ROBÔS PARALELOS	17
3.2.1 Manipuladores de 3 graus de liberdade	17
3.2.2 Manipuladores 4 graus de liberdade.....	18
3.2.3 Manipuladores de 5 graus de liberdade	19
3.2.4 Manipuladores 6 Graus de Liberdade	20
3.3 APLICAÇÕES DE ROBÔS PARALELOS	21
4 PLATAFORMA STEWART-GOUGH	24
4.1 ORIGEM PLATAFORMA STEWART-GOUGH	24
4.2 MODELO GEOMÉTRICO	25
4.3 MODELAGEM CINEMÁTICA E DINÂMICA	27
4.4 SISTEMA DE CONTROLE	30
4.4.1 Controle Torque Computado	31
4.4.2 Regulador Linear Quadrático.....	32
5 RESULTADOS	34
5.1 DINÂMICA	34
5.2 CONTROLE	40
6 CONCLUSÃO	44
ANEXO A – PUBLICAÇÕES DERIVADAS DESTE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO	48

1 INTRODUÇÃO

Nos dias atuais, fica cada vez mais evidente que as aplicações de manipuladores paralelos são bem amplas, dentre elas, destacam-se: simuladores de vôo, máquinas industriais, e por causa da sua alta precisão pode ser utilizada em robôs cirúrgicos (LARA-MOLINA, 2008). Isso requer que os robôs desempenhem as tarefas para as quais foram projetados com grande eficiência, robustez e aliados à um baixo custo de operação.

Para atingir esse objetivo, muitos trabalhos estão sendo desenvolvidos por pesquisadores, em todo o mundo. Como o trabalho de KILARU *et al.* (2015), que através de dois índices propostos, utilizaram algoritmos genéticos para otimizar o projeto dinâmico do manipulador. BENNEHAR *et al.* (2016) apresentaram um controlador baseado na lei de controle adaptativo, onde foi substituído os ganhos do feedback constante no termo de feedback PD por outras variáveis não-lineares no tempo. Já HE *et al.* (2016) desenvolveram um projeto de um controlador de impedância adaptativa para um manipulador robótico, afim de aproximar as incertezas do sistema e as saturações da entrada para evitar grandes erros de rastreamento e *overshooting*, foi implementado um controlador neural.

Este trabalho visa estudar a cinemática e a dinâmica de Stewart-Gough, o controle de posição e rastreamento das trajetórias do manipulador Plataforma de Stewart-Gough, que é um mecanismo paralelo de seis Graus de Liberdade. Os mecanismos paralelos têm como características alta rigidez, precisão nos movimentos e alta capacidade de transmissão de carga no efetuador final em função da sua estrutura cinemática.

1.1 JUSTIFICATIVAS

A modelagem da plataforma de Stewart-Gough permite que seja possível a implementação computacional, para que as principais características do movimento cinemático e dinâmico sejam conhecidas e estudadas. Com isso, é possível desenvolver o projeto do sistema de controle para que o robô realize sua tarefa, para qual foi projetado. As simulações computacionais diminuem muito os custos de projeto, pois elas permitem que se conheça, previamente, as singularidades e possíveis erros de projeto do manipulador antes do mesmo ser construído.

Esse trabalho consiste na modelagem dinâmica da plataforma de Stewart-Gough, que será implementado computacionalmente para realização de simulações para estudo da sua dinâmica e, assim, conhecer suas principais características. Para

então, realizar o projeto do seu controlador PD, através das técnicas de controle do Torque Computado e Regulador Linear Quadrático.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo analisar a dinâmica e projetar o sistema de controle de movimentos da plataforma de Stewart-Gough mediante simulação computacional.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Revisar a bibliografia relacionada com a proposta do trabalho
- Definir o modelo cinemático e dinâmico da Plataforma Stewart-Gough;
- Implementar a simulação computacional do modelo da Plataforma Stewart-Gough no software Matlab/Simulink®;
- Projetar o controle Proporcional-Derivativo (PD) e Regulador Linear Quadrático (LQR) de posição e rastreamento de trajetória da Plataforma Stewart-Gough;
- Analisar os resultados a partir dos dados obtidos com as simulações computacionais realizadas.

1.3 METODOLOGIA

Para realizar este trabalho foram seguidos os seguintes passos:

1. Revisão da Literatura: Estudar na literatura dos trabalhos relacionados ao tema Plataforma Stewart e controle de manipuladores paralelos.
2. Modelagem Cinemática e Dinâmica da Plataforma Stewart-Gough: Estabeleceu-se a modelagem cinemática e dinâmica do manipulador através do trabalho desenvolvido por Dasgupta e Mruthyunjaya (1998) através da formulação de Newton-Euler.

3. Simulação da Plataforma Stewart: Foi implementado os modelos cinemático e dinâmico no software Matlab/Simulink[®] para realizar simulações. A simulação do movimento da plataforma foi realizada a partir de uma força imposta, para então se analisar o movimento do manipulador.
4. Implementação do controle PD e LQR na Plataforma de Stewart-Gough: para controlar o rastreamento da trajetória, erros de posição e a reação a partir de uma perturbação.
5. Análise de Resultados: Por fim, uma análise dos resultados obtidos com os controles das trajetórias determinadas e das reações a uma perturbação, executadas pelo manipulador Plataforma Stewart-Gough.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Primeiramente, no capítulo 2, será apresentada uma revisão da literatura sobre trabalhos considerados essenciais que vem sendo realizados sobre modelagem de manipuladores paralelos, simulação de robôs paralelos e também controle de manipuladores. No capítulo 3 é mostrada a fundamentação teórica sobre sistemas robóticos em geral e também suas classificações e principais aplicações.

O capítulo 4 é dedicado à Plataforma de Stewart-Gough, incluindo a análise dinâmica da Plataforma de Stewart-Gough, que foi desenvolvida previamente por DASGUPTA; MRUTHYUNJAYA (1998). Baseada nesta contribuição, a modelagem dinâmica completa da Plataforma de Stewart-Gough será demonstrada através da formulação de Newton-Euler, que permite expressar a equação dinâmica mediante uma expressão fechada. Serão introduzidas as técnicas de Controle de Torque Computado (CTC) e Regulador Linear Quadrático, do inglês Linear Quadratic Regulator (LQR) para poder, então, aplicar técnicas para o controle ótimo na Plataforma Stewart-Gough.

No capítulo 5, será feita a análise do comportamento dinâmico do manipulador, com o auxílio do software Matlab/Simulink[®], onde a partir de uma força de entrada e a partir dos resultados obtidos e estudados, será realizado o projeto do controlador da Plataforma de Stewart-Gough. Assim, são realizadas as simulações adicionando um controlador PD e utilizando o modelo completo da plataforma de Stewart-Gough, para assim comparar o desempenho das técnicas CTC e LQR na precisão do rastreamento de trajetória com ambos controladores e erros de posição.

Finalmente, no capítulo 6, são apresentadas as principais conclusões deste trabalho juntamente com as perspectivas futuras.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Primeiramente, foi realizada uma revisão da literatura sobre robôs paralelos em geral, juntamente com trabalhos voltados para a Plataforma de Stewart-Gough e o projeto do seu sistema de controle. Muitos trabalhos foram desenvolvidos durante as últimas décadas, relacionados ao movimento cinemático e dinâmico da plataforma, sua modelagem, simulações, singularidades e o controle da plataforma. Para uma melhor compreensão serão apresentados a seguir, em três sessões, trabalhos sobre a modelagem de manipuladores paralelos, simulações de robôs paralelos e o sobre as técnicas de controle.

2.1 MODELAGEM DE MANIPULADORES PARALELOS

MARTINS *et al.* (2003) realizaram a modelagem dinâmica de sistemas com estruturas mecânicas e atuadores diferentes. Foram consideradas as diferentes geometrias e propriedades dos materiais utilizados em cada um dos manipuladores para a realização da modelagem. Então, foram validadas as modelagens através de simulações, tal como algumas comparações de desempenho dos manipuladores diferentes.

LI; XU (2006) desenvolveram o projeto de um novo manipulador paralelo translacional de 3 graus de liberdade, chamado 3-PRC. Apresentaram então a modelagem completa do manipulador, que através de análises do modelo cinemático, permitiu um projeto de um manipulador em que fossem eliminadas todas as singularidades e fosse isotrópico. O desenho do manipulador 3-PRC, pode ser observado na figura 1.

Em relação ao estudo dinâmico da plataforma de Stewart-Gough, LIU; LI; LI (2000) implementaram no MATLAB a formulação da dinâmica direta da Plataforma de Stewart-Gough baseada na equação de Kane, onde são fornecidas forças para cada atuador e condições iniciais de posição e velocidade inicial, encontrando então a posição e a orientação do manipulador e para os atuadores são encontradas as velocidades lineares e posições de cada um.

LOPES (2009) fez a modelagem da Plataforma de Stewart-Gough utilizando uma aproximação chamada momento generalizado, que é usado para calcular a componente cinética da força generalizada agindo em cada parte rígida do manipulador.

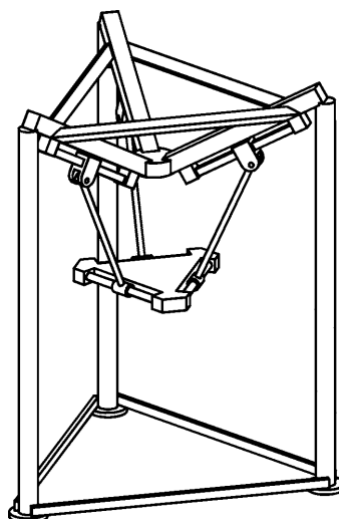


Figura 1 – Manipulador Paralelo 3-PRC.

Fonte – (LI; XU, 2006)

2.2 SIMULAÇÕES DE ROBÔS PARALELOS

GUO; LI (2006) apresentam as equações do manipulador utilizando o método de Newton-Euler combinado com o de Lagrange-Euler, foram então implementados no Matlab[®] e validados com os parâmetros do trabalho de TSAI (2000), obtendo como resultado as forças nos atuadores.

LI *et al.* (2003) apresentaram a formulação dinâmica de um robô paralelo de 3 graus de liberdade através da formulação de Newton-Euler, onde o robô apresenta dois graus de liberdade translacional e um rotacional. É analisado então, em primeiro lugar, a cinemática inversa de forma fechada. E de acordo com as restrições cinemáticas das pernas e da plataforma é definido um algoritmo para solucionar as forças do atuador. Para validar os resultados das simulações matemáticas são comparadas com os resultados do software ADAMS[®]. O modelo implementado no ADAMS[®], pode ser visto na figura 2

Para estudar o movimento de um terremoto, CECCARELLI; OTTAVIANO; GALVAGNO (2002) utilizaram um manipulador paralelo de 3 graus de liberdade, chamado *Cassino Parallel Manipulator*, como simulador. Os movimentos foram determinados através de simulações numéricas para aproximar os efeitos de um terremoto e aplicados no manipulador através de um motor e medidos com um acelerômetro.

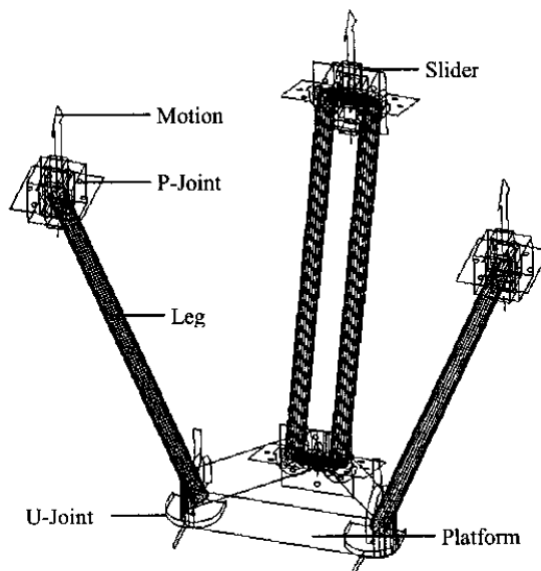


Figura 2 – Modelo do manipulador de 3 gdl no Adams.

Fonte – (LI *et al.*, 2003)

2.3 CONTROLE

Existem diversos trabalhos que foram desenvolvidos recentemente, que envolvem o controle da posição e da trajetória de manipuladores paralelos e em especial da plataforma Stewart-Gough. Como o trabalho proposto por DAVLIAKOS; PAPADOPOULOS (2007), no qual aplicou-se o controle PD para o controle de posição da Plataforma de Stewart-Gough com atuadores eletro-hidráulicos.

GHOBAKHLOO; EGHTESAD; AZADI (2006) adotaram um controlador PD utilizando a dinâmica inversa da Plataforma de Stewart-Gough, para simular uma trajetória para o manipulador, obtendo dessa forma os erros de posição e orientação para assim realizar a compensação através do controlador e das forças aplicadas nos atuadores, mostrando deste modo a eficiência do controlador.

Para realizar o controle de posição da plataforma de Stewart-Gough, LEE *et al.* (2003) projetaram um controlador H_{∞} na malha externa, para compensar os erros da modelagem causadas pelas aproximações, que são tratados como perturbações.

GUO *et al.* (2008) utilizaram um controle em cascata para controlar a trajetória de um manipulador com 6 graus de liberdade. O controle cascata, com um ciclo interno e externo, para que assim não fosse considerado somente a dinâmica mecânica, mas também a dinâmica hidráulica do manipulador.

2.4 PRESENTE TRABALHO

Este trabalho irá analisar a cinemática e a dinâmica da plataforma de Stewart-Gough através dos dados do trabalho desenvolvido previamente por DASGUPTA; MRUTHYUNJAYA (1998) será implementado o modelo dinâmico com o auxílio computacional do software Matlab/Simulink[®]. A partir disso, serão feitas simulações para avaliar o comportamento dinâmico da plataforma baseado no modelo dinâmico. Na simulação dinâmica será imposta uma força em cada uma das pernas em forma de pulso para então avaliar o comportamento da Plataforma de Stewart-Gough.

Após a análise dinâmica será feito o projeto do controlador do manipulador, onde primeiramente serão introduzidas as técnicas de CTC e LQR. E em seguida, serão realizadas as simulações para comparar os resultados e os desempenhos de ambas as técnicas de controle juntamente com um controlador PD. Será avaliado a precisão do rastreamento de trajetória com ambos controladores e erros de posição.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 SISTEMAS ROBÓTICOS

A definição básica da palavra robô pode ser encontrada de várias formas na literatura, algumas delas, segundo FERREIRA (1986), é uma máquina, de aspecto humano, capaz de se movimentar e de agir. Ou também, um mecanismo, comandado por controle automático. Independente da definição de robô, pode se dizer que um sistema robótico é representado basicamente pelos seguintes componentes: o manipulador, sistema de controle, efetuador, computador e sensores. Como pode-se observar na figura 3.



Figura 3 – Componentes de um sistema robótico.

Fonte – (LARA-MOLINA, 2008)

O controlador é o sistema que basicamente gerencia o dispositivo, a partir de entradas de modo que resulte na ação esperada. Na seção 4.4, será abordado mais sobre o tema. O efetuador é a parte do manipulador que realiza o trabalho de transporte, manipulação ou uma tarefa para qual o robô foi projetado. São os atuadores que realizam o movimento mecânico dos braços, ou *link*, a partir de uma energia elétrica, hidráulica ou pneumática. Eles podem ser pistões hidráulicos ou pneumáticos,

motores elétricos.

O manipulador é a estrutura mecânica do robô, em que corpos são interligados através de juntas, que realizam o movimento entre os corpos. Os manipuladores são classificados de várias formas, tal como: número de graus de liberdade, estrutura cinemática, geometria do espaço de trabalho e pela particularidade de seu movimento. Para este trabalho é conveniente utilizar a classificação do manipulador em relação a sua estrutura cinemática.

Um manipulador serial possui a forma de cadeia cinemática aberta. O paralelo tem a forma de cadeia cinemática fechada e o híbrido, como o próprio nome já diz, uma junção de aberta e fechada. Abaixo, na figura 4, pode-se observar um exemplo de um manipulador em série e um manipulador paralelo:



Figura 4 – Manipulador em série (esquerda) e o manipulador paralelo (direita).

Fonte – (Kuka-Robotics, 2016) e (CAR-D, 2016)

3.1.0.1 Características dos manipuladores em série e paralelo

A comparação das características dos manipuladores é importante para identificar a melhor aplicabilidade de cada um, levando em consideração as particularidades mecânicas e também os problemas de controle. Os manipuladores seriais, em termos mecânicos, são compostos por atuadores nas suas partes móveis, que resultam em momentos de inércia relativamente altos. Nos manipuladores paralelos, todos os atuadores são montados próximos a base, possibilitando assim numa possível redução da massa nas suas partes móveis. Isso implica, que os manipuladores paralelos apresentem características dinâmicas superiores em relação aos manipuladores seriais (LARA-MOLINA, 2008).

Para o controle, a cinemática do manipulador é fundamental, com a cinemática direta, a posição e a orientação do efetuador são determinadas em função das articulações. A modelagem cinemática inversa não é tão simples quanto a direta, mas ela

é necessária para o cálculo dos deslocamentos de cada junta, quando são considerados os movimentos no espaço de trabalho, como por exemplo, no caso do movimento de um efetuador final ao longo de uma trajetória. Para os robôs em série os erros de posicionamento nas articulações são somados, ao mesmo tempo que nos robôs paralelos, esses erros são a média de todos os erros. Outra consideração importante, que em manipuladores seriais quando estão sobre condições de carga, podem apresentar vibrações e flambagem, o que é uma vantagem para os manipuladores paralelos que apresentam uma maior precisão e capacidade de posicionamento por terem um melhor desempenho dinâmico e rigidez, pelo fato do seu efetuador ser unido à base por diversas cadeias cinemáticas (ACUÑA, 2009).

3.2 CLASSIFICAÇÃO DOS ROBÔS PARALELOS

Segundo MERLET (2006), um robô paralelo é composto por um efetuador com n graus de liberdade, de uma base fixa, ligados por si através de pelo menos duas cadeias cinemáticas independentes. E o movimento é dado através de n atuadores. Sua classificação é dada pelo número de graus de liberdade do sistema.

3.2.1 Manipuladores de 3 graus de liberdade

Os manipuladores de 3 gdl, de acordo com a classificação de MERLET (2006), são divididos entre manipuladores de translação, orientação e de graus mistos. Um dos robôs de 3 gdl mais famoso é o Delta, que foi desenvolvido na *École Polytechnique Federale de Lausanne* por Clavel. O Delta, que pode ser visto na figura 5, tem várias aplicações tal como: na automação industrial, automotivo, eletrônica, máquinas operatrizes e processo de alimentos. Outro robô de 3 gdl é o Othorglide, que apresenta um desempenho relativamente homogêneo em seu espaço cartesiano com uma orientação fixa.



Figura 5 – O robô de Delta e uma versão industrial, o FlexPicker IRB 340.

Fonte – (MERLET, 2006)

Um manipulador de orientação, permite que ocorram 3 orientações sobre um ponto, são uma alternativa para o pulso com três juntas revolutas tendo eixos convergentes normalmente usados para robôs seriais. Um exemplo é o modelo de correntes esféricas proposto por Asada e desenvolvido por Gosselin (figura 6). Esse manipulador usa suas três cadeias esféricas com atuadores que rotacionam com eixos que convergem para um ponto que é o centro de rotação (MERLET, 2006).

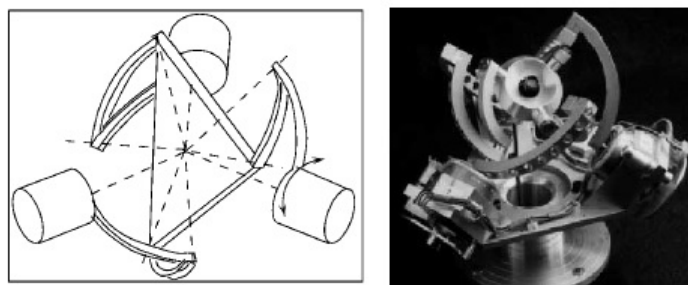


Figura 6 – Protótipo desenvolvido por Gosselin

Fonte – (MERLET, 2006)

Por fim, os manipuladores de graus mistos, têm com uma combinação dos três graus de liberdade anteriores com translação ao longo do eixo vertical e rotação em torno dos outros dois eixos mutuamente ortogonais.

3.2.2 Manipuladores 4 graus de liberdade

De acordo com MERLET (2006), é teoricamente impossível desenvolver um manipulador de 4 graus de liberdade com pernas idênticas. Esses manipuladores são encontrados a muito tempo na literatura. Em 1975, Kovermans apresentou um simula-

dor de vôo baseado em um sistema de restrição passiva, com graus de liberdade em três rotações e uma translação em torno do eixo z, como pode ser visto na figura 7 (MERLET, 2006).

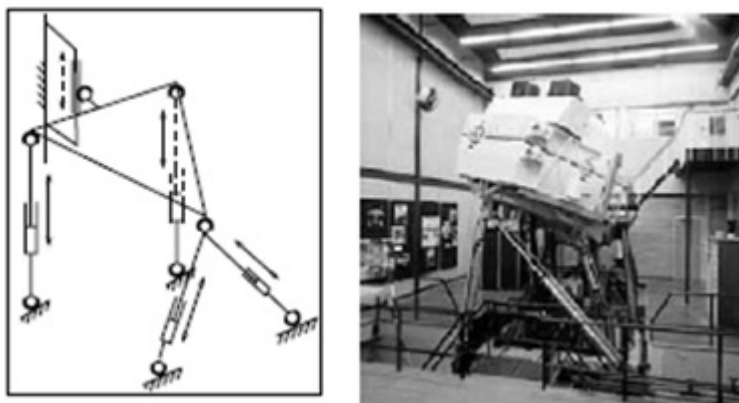


Figura 7 – Robôs de 4 Graus de Liberdade

Fonte – (MERLET, 2006)

3.2.3 Manipuladores de 5 graus de liberdade

Robôs paralelos de cinco graus de liberdade dependem de restrição passiva, geometria ou design específico. Essa estrutura é de grande interesse para o campo das máquinas ferramenteiras, chamada de máquina de cinco eixos. O mastro passivo é interessante para a rigidez do robô (aproximadamente equivalente a um manipulador de 6 gdl, exceto pelo grau de liberdade que é limitada pelo mecanismo passivo), mas o espaço de trabalho é diminuído pela interferência das pernas. Na figura 8, pode ser visto um exemplo, onde uma das pernas ativas restringe um grau de liberdade da plataforma.

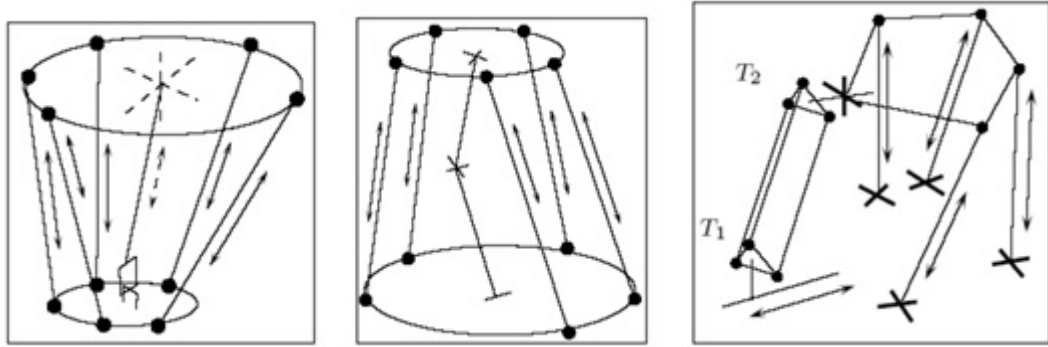


Figura 8 – Robôs de 5 Graus de Liberdade

Fonte – (MERLET, 2006)

3.2.4 Manipuladores 6 Graus de Liberdade

Os manipuladores de 6 graus de liberdade apresentam três translações e três rotações nos eixos X, Y, Z. Segundo MERLET (2006), esse manipulador trabalha com diferentes cadeias cinemáticas, que podem ser RRPS, RPRS, PRRS, RRRS, onde R representa a junta do tipo esférica, P a junta prismática e S universal. Todos esses tipos são basicamente equivalentes, no que se diz respeito a mobilidade da plataforma, a ordem das juntas não tem relevância, e a junta prismática pode ser substituída pela junta esférica e vice-versa. Porém a performance do movimento da plataforma é diferente, então, é importante apresentar vários robôs com diferentes estruturas cinemáticas. Na figura 9, são mostrados exemplos de robôs de 6 gdl.

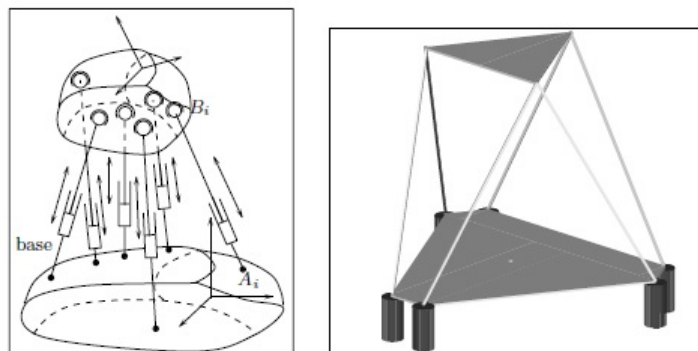


Figura 9 – Robôs de 6 Graus de Liberdade.

Fonte – (MERLET, 2006)

3.3 APLICAÇÕES DE ROBÔS PARALELOS

Robôs paralelos são aplicados atualmente em diversas áreas da engenharia pelas características já mencionadas. Algumas das principais aplicações que podem ser enfatizadas são:

Aplicações Aeroespacial

Devido a alta tecnologia e recursos financeiros disponíveis da indústria aeroespacial se torna viável a construção de manipuladores simuladores. Como o simulador que foi desenvolvido para testar o atracamento entre uma espaçonave e uma estação espacial, onde o manipulador foi instrumentado com sensores de força para que desempenhe uma função semelhante ao modelo dinâmico de uma estação que está sujeito à um impacto (MERLET, 2006).

Foi elaborado um robô hexápode pelo *Instituto Max Planck* para ser usado com o telescópio *UKIRT (United Kingdom Infra-Red Telescope)* para movimentos lentos de foco. Uma empresa alemã, a *Vertex*, utiliza uma estrutura paralela para fabricar telescópios (MERLET, 2006).

Aplicações de Entreterimento

Robôs paralelos são utilizados para fins de entreterimento também. Como simuladores, que são utilizados para diversão, onde robôs imitam diversas situações reais, tal como o simulador da Mercedes Benz (figura 10), que permite que a pessoa se sinta em um carro de Fórmula 1. Nesta mesma linha, a empresa Cruden desenvolve vários tipos de simuladores em que o usuário tenha a experiência de dirigir um carro de corrida (figura 10). Além da diversão, faz com que os pilotos profissionais melhorem suas habilidades através de treinos. Esse tipo de equipamento é empregado frequentemente, por engenheiros, para que se possa melhorar o tempo de uma volta em uma corrida sem comprometer as peças do veículo.

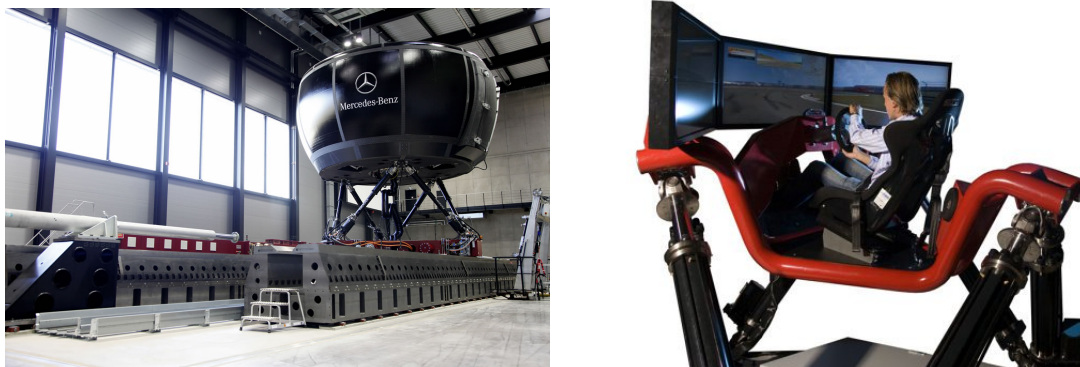


Figura 10 – Robôs utilizados para fins de entretenimento.

Fonte – (Daimler-Benz, 2016) e (Cruden, 2016)

Aplicações Médicas

Os robôs paralelos são utilizados também em aplicações médicas. Pela sua precisão são utilizados em robôs cirurgicos. Eles também ajudam na assistência de pessoas com deficiência para movimentar seus braços como mostrado por ARAI *et al.* (1990). Na figura 11, pode-se observar algumas aplicações na medicina de robôs paralelos.

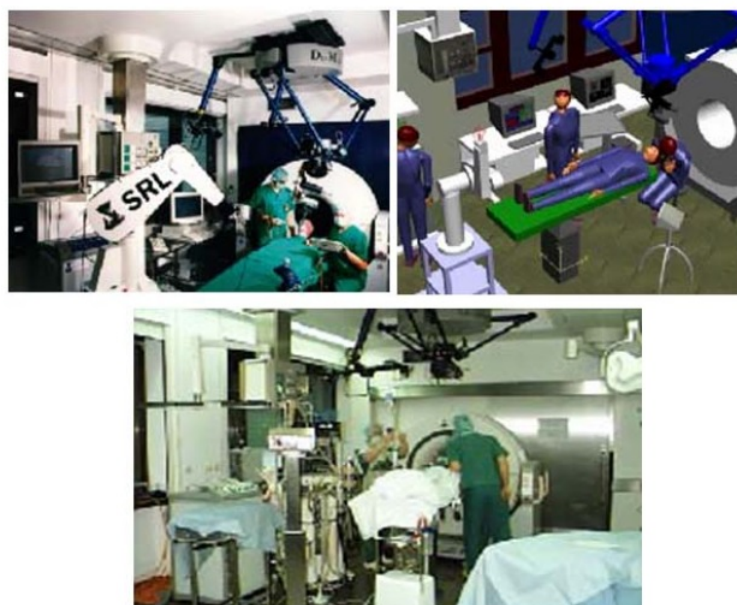


Figura 11 – Robôs utilizados para em aplicações na medicina.

Fonte – (LARA-MOLINA, 2008)

Aplicações Industriais

No setor industrial as principais aplicações de robôs paralelos são em atividades onde é necessária a manipulação de peças, montagem e desmontagem, soldagem a ponto e aplicações usando realimentação de força. O robô delta é utilizado amplamente na indústria, pois apresenta um bom desempenho para a manipulação de objetos. Já a Plataforma de Stewart-Gough é utilizada no posicionamento de peças mecânicas complexas e também para a execução de operações de fresagem e usinagem em 3 e 5 eixos (LARA-MOLINA, 2008).

4 PLATAFORMA STEWART-GOUGH

4.1 ORIGEM PLATAFORMA STEWART-GOUGH

Em 1947, Gough projetou uma plataforma paralela com geometria octaedro hexápode (figura 12), com lados de longitude variável (GOUGH; WHITEHALL, 1962). O objetivo do desenvolvimento dessa plataforma era poder testar os pneus durante o pouso de um avião, assim era permitida a aplicação de pequenas cargas em diferentes direções através do acionamento de atuadores hidráulicos de maneira independente.

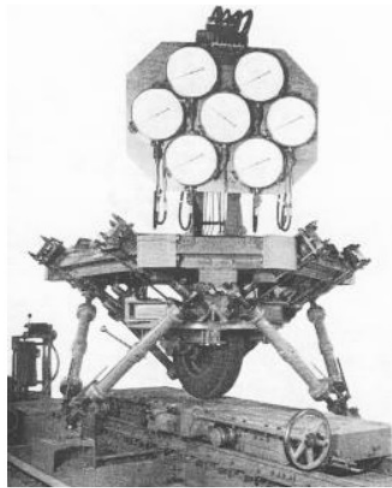


Figura 12 – Plataforma projetada por Gough em 1954.

Fonte – (STEWART, 1965)

Stewart apresentou em 1965 um artigo considerado como precursor no desenvolvimento de plataformas paralelas (figura 13), onde descreve uma plataforma com seis graus de liberdade para ser utilizada em simuladores de voo (STEWART, 1965). A configuração proposta por Stewart apresenta alterações consideráveis em relação à configuração proposta por Gough. A partir destes dois pesquisadores, vem o nome da Plataforma de Stewart-Gough.

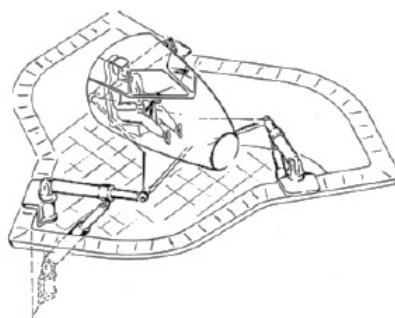


Figura 13 – Plataforma de projetada por Stewart.

Fonte – (STEWART, 1965)

4.2 MODELO GEOMÉTRICO

A plataforma de Stewart-Gough que pode ser vista na figura 14, possui seis pernas idênticas que ligam a base fixa até a plataforma móvel por juntas universais indicadas por U nos pontos B_i e articulações esféricas representadas por S em pontos de A_i , $i = 1, 2, \dots, 6$, respectivamente. Cada perna possui um membro superior e inferior ligados por um conjunto prismático simbolizado por P . A junta prismática é motorizada para estender e retrair a perna. É possível substituir a junta universal por uma junta esférica, sem alterar o movimento da plataforma móvel.

Os seis gdl que a plataforma possui, permitem três movimentos lineares e três movimentos angulares. Os movimentos lineares são movimentos longitudinais nos eixos x , y e z . Os movimentos angulares são expressos como ângulos de Euler que diz respeito aos respectivos eixos.

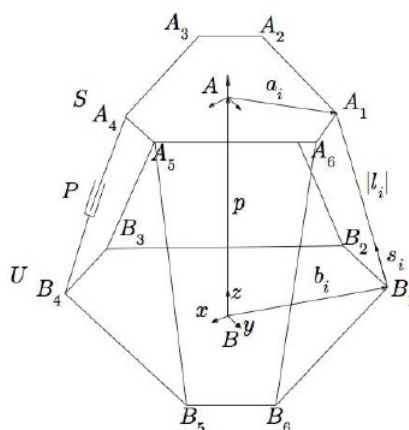


Figura 14 – Plataforma de Stewart-Gough.

Fonte – (LARA-MOLINA; ROSÁRIO; DUMUR, 2011)

As juntas podem ser utilizadas para classificar a estrutura da Plataforma de Stewart-Gough, como a 6-SPS (do inglês, *spherical-prismatic-spherical*), que é conectado na base e na plataforma por juntas esféricas como pode ser visto na figura 15.

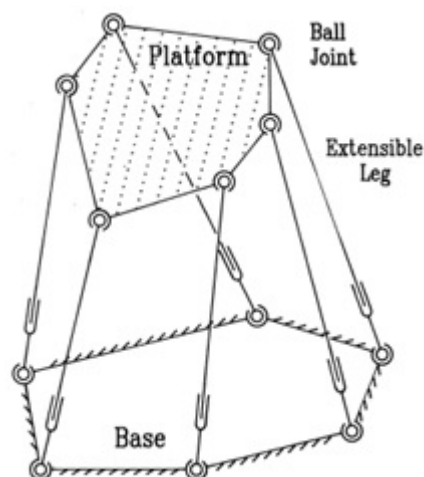


Figura 15 – Plataforma de Stewart-Gough 6-SPS.

Fonte – (DASGUPTA; MRUTHYUNJAYA, 1998)

A estrutura pode ser também 6-UPS (do inglês, *universal-prismatic-spherical*), onde a junta que liga a plataforma também é uma junta esférica, mas a junta que liga a base é do tipo universal, como mostra a figura 16. A estrutura 6-UPS foi a escolhida para este trabalho.

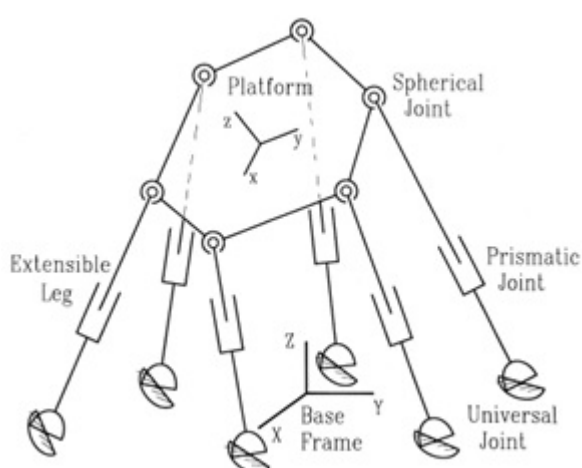


Figura 16 – Plataforma de Stewart-Gough 6-UPS.

Fonte – (DASGUPTA; MRUTHYUNJAYA, 1998)

Afim de provar o número de gdl's da plataforma, pode ser utilizado o método de Grübler (CRAIG, 2012), com a seguinte equação:

$$Gdls = \lambda(n - j - 1) + \sum_{i=1}^j G_i + G_p \quad (4.1)$$

Onde,

$Gdls$ = Número de graus de liberdade do mecanismo;

λ = Graus de liberdade do espaço onde o mecanismo está ($\lambda = 3$ para o caso planar e $\lambda = 6$ para o caso espacial);

n = Número de elos fixos do mecanismo incluindo a base;

j = Número de juntas no mecanismo;

G_i = Graus do movimento relativo pela junta;

G_p = Número de gdl's passivos do mecanismo.

Para o 6-UPS, que será utilizado neste trabalho, temos que $\lambda = 6$ (espacial), $n = 14$, $j = 18$, sendo que 6 são dos atuadores lineares, 6 das juntas universais de 2 graus de liberdade e 6 das juntas esféricas com 3 graus de liberdade, por fim temos que $G_p = 0$, pois para o mecanismo não existe gdl passivo. Substituindo os valores da plataforma 6-UPS na equação 4.1, é obtido:

$$Gdls = 6(14 - 18 - 1) + (6 + 6 \times 2 + 6 \times 3) = 6$$

Então podemos concluir, que pelo critério de Grübler que a plataforma Stewart 6-UPS apresenta mesmo os 6 graus de liberdade.

4.3 MODELAGEM CINEMÁTICA E DINÂMICA

A cinemática inversa representa as seis pernas de comprimento $l_i = [l_1, \dots, l_6]^T$ como função da posição p e orientação dos ângulos de Euler θ da plataforma móvel.

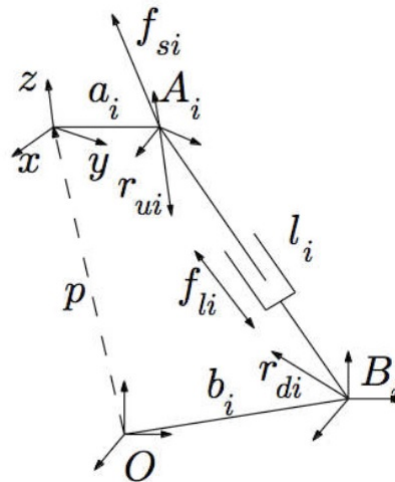


Figura 17 – Perna da Plataforma de Stewart-Gough.

Fonte – (LARA-MOLINA; ROSÁRIO; DUMUR, 2011)

Assim, $p = [x \ y \ z]^T$ e $\theta = [\alpha \ \beta \ \gamma]^T$ resulta em uma matriz de rotação $R = R_x(\alpha) R_y(\beta) R_z(\gamma)$. Dessa forma, considerando o vetor em série $\{B\}\{A\}A_iB_i$ (ver figura17). A cinemática inversa para cada perna é

$$l_i = Ra_i + p + b_i \quad L_i = ||l_i|| \quad (4.2)$$

onde a_i e b_i são vetores que definem a geometria da plataforma móvel e da base fixa, respectivamente. O vetor unitário ao longo de l_i é $s_i = l_i / L_i$. A velocidade no ponto A_i da plataforma móvel é:

$$\dot{l}_i = \omega \times a_i + \dot{p} \quad (4.3)$$

sendo ω a velocidade angular da plataforma móvel. A velocidade relativa entre a parte superior e inferior da perna $\dot{l}_i = s_i$; similarmente, a velocidade angular das pernas é $\omega_{bi} = s_i \times l_i / L_i$. Portanto, a aceleração no ponto A_i da plataforma móvel é:

$$\ddot{l}_i = \underbrace{\ddot{p} + \alpha + a_i}_{a_p} + \underbrace{\omega \times (\omega \times \alpha)}_{h_1} \quad (4.4)$$

A aceleração do centro de gravidade das partes inferiores e superiores das pernas, são:

$$a_{di} = \frac{1}{L_i} (s \times a_p) \times r_{di} + h_{3i} \quad a_{ui} = (s_i \cdot a_p) \cdot s_i + \frac{1}{L_i} (s_i \times a_p) \times r_{ui} + h_{4i} \quad (4.5)$$

onde r_{di} e r_{ui} são os centros de gravidade da parte inferior e superior, $h_{3i} = h_{2i} \times r_{di} + \omega(\omega \times r_{di})$ e $h_{4i} = s_i \times h_1 + h_2 \times r_{ui} + \omega \times (\omega \times r_{ui}) + 2\dot{l}_i \omega$, $h_{2i} = \frac{1}{l_i} (s_i \times h_1 - 2l_i \omega)$. Considerando

a análise dinâmica, a equação de Euler é aplicada para o equilíbrio rotacional da perna inteira, assim:

$$m_{di}.r_{di} \times a_{di} - m_{ui}.r_{ui} \times a_{ui} + (m_{di}.r_{di} + m_{ui}.r_{ui}) \times g - (I_{di} + I_{ui}).\Lambda_{bi} - \omega_b \times (I_d + I_u).\omega_{bf} + M_{ui}.s_i + l_i \times f_{si} - c_{ui}\omega_{bi} - f_i = 0 \quad (4.6)$$

a aceleração da perna é representada por Λ_{bi} , f_{si} é a força de restrição da junta esférica que atua na perna, f_i representa o momento da fricção viscosa na i -ésima junta esférica, assim $f_i = c_{si}(\omega_{bi} - \omega_i)$ e f_{li} é a força de entrada na perna i -ésima. Para a parte superior da perna, o equilíbrio translacional é:

$$f_{li} + s_i.f_{si} - c_{pi}.\dot{l}_i - m_{ui}.s_i.g = 0 \quad (4.7)$$

A equação que expressa f_{si} , resulta em substituições entre as equações demonstradas acima, têm muitos termos que dependem de a_p . Desta forma, para se usar essa expressão na equação dinâmica da plataforma, todos esses termos são agrupados na forma de uma matriz Q (3×3), assim:

$$f_{si} = Qa_p + v - s_i.f_{li} \quad (4.8)$$

onde,

$$Q = \left[m_{ui} \cdot \left(1 + \frac{2.s_i.r_{ui}}{L_i} \right) - \frac{m_{di}.r_{di}^2 + m_{ui}.r_{ui}^2}{L_i^2} \right] \cdot s_i \cdot s_i^T + \frac{m_{di}.r_{di}^2 + m_{ui}.r_{ui}^2}{L_i^2} \cdot I - \frac{m_{ui}}{L_i} (s_i.r_{ui}^T + r_{ui}.s_i^T) - \frac{1}{L_i^2} [m_{di} \cdot (s_i \times r_{di}) \cdot (s_i \times r_{ui})^T + m_{ui} \cdot (s_i \times r_{ui}) \cdot (s_i \times r_{ui})^T - \tilde{s}_i \cdot (I_d - I_u) \cdot \tilde{s}_i]$$

Finalmente, depois de algumas substituições de a_p pela expressão na equação 4.3, está equação representa a força de reação do ponto de conexão i -ésima da plataforma, como pode ser visto na figura 17.

$$f_{si} = Q_i.\ddot{p} - Q_i.a_i.\alpha + v_i - s_i.f_{li} \quad (4.9)$$

Cinemática e dinâmica da plataforma móvel

Aplicando a expressão obtida com a equação 4.9, para as seis pernas ($i = 1, \dots, 6$), a equação dinâmica da plataforma pode ser formulada. Em seguida, a aceleração do centro de gravidade da plataforma é determinada por:

$$a_p = \alpha \times r_{pA} + \omega \times (\omega \times r_{pA}) + \ddot{p} \quad (4.10)$$

onde, $r_p = Rr_{pA}$ e r_{pA} demonstram a distância do centro de gravidade da plataforma até o sistema de referência $\{A\}$. Aplicando a equação de Newton para o equilíbrio

translacional e a equação de Euler para o equilíbrio rotacional da plataforma, se obtém respectivamente:

$$m_p \cdot a_p + m_p \cdot g - \sum_{i=1}^6 (f_{si}) = 0 \quad (4.11)$$

$$m_p \cdot r_{pA} \times a + m_p \cdot r_{pA} \times g - I \cdot \alpha - \omega \times I_p \cdot \omega + \sum_{i=1}^6 [a_i \times f_{si}] + \sum_{i=1}^6 f_i = 0 \quad (4.12)$$

sendo m_p a massa e $I_p = RI_{pA}R^T$ a inércia da plataforma e a carga útil. Por fim, as expressões de a_p e f_{si} são substituídas em equações de Newton-Euler e a equação dinâmica completa é obtida:

$$J \cdot \begin{bmatrix} \ddot{p} \\ \alpha \end{bmatrix} + \eta = H \cdot f_l \quad (4.13)$$

onde, $J = J_p + \sum_{i=1}^6 J_i$; $\eta = \eta_p + \sum_{i=1}^6 \eta_i$ e $J_p = \begin{bmatrix} m_p \cdot I & -m_p \cdot \tilde{r}_p \\ m_p \cdot \tilde{R} & I_p + m_p (||r_p||^2 \cdot I - r_p \cdot r_p^T) \end{bmatrix}$,

$$J_i = \begin{bmatrix} Q_i & -Q_i \\ \tilde{a}_i \cdot Q_i & -\tilde{a}_i \cdot Q_i \cdot \tilde{a}_i \end{bmatrix}, \eta_p = \begin{bmatrix} m_p \cdot [\omega \times (\omega \times r_p) - g] \\ \omega \times I_p \cdot \omega + m_p \cdot R \times [(\omega \cdot r_p) \cdot \omega - g] \end{bmatrix},$$

$$\eta_i = \begin{bmatrix} V_i \\ a_i \times V_i - f_{li} \end{bmatrix}, H = \begin{bmatrix} s_1 & \dots & s_6 \\ a_i \times s_1 & \dots & a_6 \times s_6 \end{bmatrix},$$

Essas matrizes representam a matriz Jacobiana do manipulador, e $f_{li} = \begin{bmatrix} f_{l1} & \dots & f_{l6} \end{bmatrix}^T$. As equações da junta dinâmica são obtidas usando a aceleração do deslizamento das juntas prismáticas da perna i -enesima:

$$\begin{bmatrix} \ddot{p} \\ \alpha \end{bmatrix} = H^T (\ddot{L}_i - u) \quad (4.14)$$

Finalmente, tem-se a equação dinâmica da plataforma de Stewart-Gough:

$$H^{-1} J H^{-T} \ddot{L}_i + H^{-1} (\eta - J H^{-T} u) = f_l \quad (4.15)$$

4.4 SISTEMA DE CONTROLE

O controle cada vez mais é um elemento essencial no campo da engenharia e da tecnologia. O controle está presente em veículos espaciais, sistemas robóticos, modernos sistemas de manufatura e todas as atividades na indústria que estejam relacionadas com o controle de vazão, viscosidade, pressão, temperatura e etc.

A teoria de controle moderno está fundamentada na análise do domínio de tempo em sistemas de equações diferenciais. Essa teoria tornou o projeto dos sistemas mais simples pois está baseada em um modelo de controle real. Porém, a estabilidade do sistema é sensível ao erro entre sistema real e seu modelo. Isso significa que quando o controlador projetado a partir de um modelo for aplicado a um sistema real, o sistema poderá não ser estável. Para evitar que isso aconteça, projeta-se o sistema estabelecendo primeiro a gama de possíveis erros para depois projetar o controlador de uma forma que, se o erro do sistema estiver dentro da gama prevista, o sistema de controle projetado será sempre estável (OGATA, 2010).

4.4.1 Controle Torque Computado

Para aplicar a técnica de controle linear, é preciso linearizar a Eq. 4.15 não linear do manipulador. Com $A(L) = H^{-1}JH^{-T}$ e $B(L, \dot{L}) = H^{-1}(\eta - JH^{-T}u)$, a equação dinâmica não linear pode ser considerada, como:

$$f_l = A(L)\ddot{L} + B(L, \dot{L}) \quad (4.16)$$

Então a dinâmica do manipulador é linearizada utilizando a linearização por realimentação, (CRAIG, 2012). Assim $\hat{A}(L)$ e $\hat{B}(L, \dot{L})$ são estimadas de $A(L)$ e $B(L, \dot{L})$, respectivamente. Assumindo que $\hat{A}(L) = A(L)$ e $\hat{B}(L, \dot{L}) = B(L, \dot{L})$ (como pode ser visto na figura 18), a dinâmica é reduzida para um modelo linear associado com dois integradores, assim:

$$\ddot{q} = w \quad (4.17)$$

Sendo o w o novo vetor de controle. Essa equação corresponde ao esquema de controle da dinâmica inversa, onde o modelo da dinâmica direta é transformado em um integrador duplo. Deste modo, as técnicas de controle linear podem ser usadas para projetar o controlador de posição para o rastreamento de uma trajetória (OGATA, 2010).

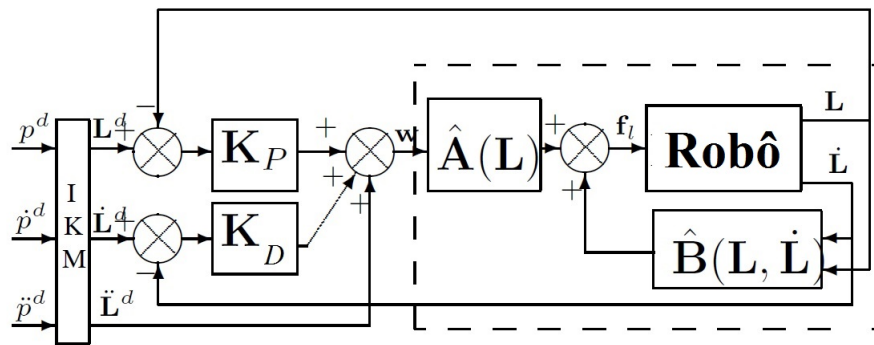


Figura 18 – Controle Torque Computado e PD

Fonte – Autoria própria.

Assumindo que a trajetória é especificada com a posição desejada L^d , velocidade \dot{L}^d e aceleração \ddot{L}^d . A lei de controle para o controlador PD é dada por:

$$w = \ddot{L}^d + K_P(L^d - L) + K_D \frac{d}{dt}(L^d - L) \quad (4.18)$$

onde $K_P = \text{diag}(k_{P_1}, \dots, k_{P_6})$ e $K_D = \text{diag}(k_{D_1}, \dots, k_{D_6})$ são as matrizes diagonais que contém os ganhos do controlador. Os ganhos dos erros são encontrados para se obter o polinômio característico do sistema controlado: $(s^2 + 2\varepsilon\omega_r s + \omega_r^2) = 0$, onde o s é a variável de Laplace. Assim, tem-se que $k_P = \omega_r^2$, $k_D = \xi\omega_r$.

4.4.2 Regulador Linear Quadrático

O método de controle ótimo quadrático fornece uma forma sistemática de calcular o ganho de controle de realimentação de estado matriz. No projeto do regulador linear quadrático considera-se uma planta linear e invariante no tempo que é dada pelo sistema descrito pela equação de estados:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (4.19)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) \quad (4.20)$$

onde A , B , C e D representam as matrizes de estado, $x(t)$ é o vetor dos estados do modelo, $u(t)$ é o vetor das entradas e $y(t)$ são as saídas do sistema genérico (OGATA,2010).

Assim tem-se a realimentação dos estados definida por:

$$u(t) = -Kx(t) \quad (4.21)$$

sendo K a matriz de realimentação dos estados. Substituindo a equação 4.21 na equação 4.19, tem-se que a resposta em malha fechada é:

$$\dot{x}(t) = (A - BK)x(t). \quad (4.22)$$

Para se obter o ganho ótimo deve se minimizar a função quadrática:

$$J = \int_0^{\infty} [x(t)^T Q x(t) + u(t)^T R u(t)] dt \quad (4.23)$$

onde as matrizes Q e R determinam a importância relativa do erro e do consumo de energia. Com os valores das matrizes Q e R , tem-se que a matriz de realimentação é representada por

$$K = R^{-1} B^T P, \quad (4.24)$$

em que $P = P^T \geq 0$ deve satisfazer a Equação Algébrica de Riccati (OGATA, 2010).

$$A^T P + P A - P B R^{-1} B^T P + Q = 0 \quad (4.25)$$

5 RESULTADOS

O modelo dinâmico direto da plataforma Stewart-Gough apresentado na equação 4.13 foi usado nas simulações do manipulador. Para simulação foram utilizados os parâmetros da tabela 1 obtidos do trabalho de DASGUPTA; MRUTHYUNJAYA (1998).

Tabela 1 – Parâmetros Manipulador (DASGUPTA; MRUTHYUNJAYA, 1998)

Parâmetros	Valores
a_i	$\begin{bmatrix} 0,3 & 0,0 & 0,1 \\ 0,3 & 0,2 & 0,0 \\ 0,0 & 0,3 & 0,0 \\ -0,2 & 0,1 & -0,1 \\ -0,15 & -0,2 & -0,05 \\ 0,15 & -0,15 & -0,05 \end{bmatrix} m$
b_i	$\begin{bmatrix} 0,6 & 0,2 & 0,0 \\ 0,1 & 0,5 & 0,1 \\ -0,3 & 0,3 & 0,1 \\ 0,3 & -0,4 & 0,0 \\ 0,2 & -0,3 & -0,05 \\ 0,5 & -0,2 & 0,0 \end{bmatrix} m$
m_p	40 Kg
r_d	3 Kg
m_u	1 Kg
r_d	$\begin{bmatrix} 0,4 & 0,14 & -0,18 \end{bmatrix}^T m$
r_u	$\begin{bmatrix} -6 & 0,08 & -0,08 \end{bmatrix}^T m$
r_p	$\begin{bmatrix} 0,04 & 0,03 & -0,06 \end{bmatrix}^T m$
I_d	$\begin{bmatrix} 0,010 & 0,005 & 0,007 \\ 0,005 & 0,002 & 0,003 \\ 0,007 & 0,003 & 0,001 \end{bmatrix}^T Kgm^2$
I_u	$\begin{bmatrix} 0,005 & 0,002 & 0,002 \\ 0,005 & 0,002 & 0,001 \\ 0,002 & 0,001 & 0,003 \end{bmatrix}^T Kgm^2$
I_p	$\begin{bmatrix} 0,05 & 0,003 & 0,004 \\ 0,002 & 0,040 & 0,003 \\ 0,004 & 0,003 & 0,100 \end{bmatrix}^T Kgm^2$

5.1 DINÂMICA

Para o estudo dinâmico foram realizadas simulações, afim de testar o comportamento da plataforma quando são impostas forças de entrada, que foram implementadas utilizando o software Matlab/Simulink®. O modelo implementado no Simulink®,

está representado na figura 19.

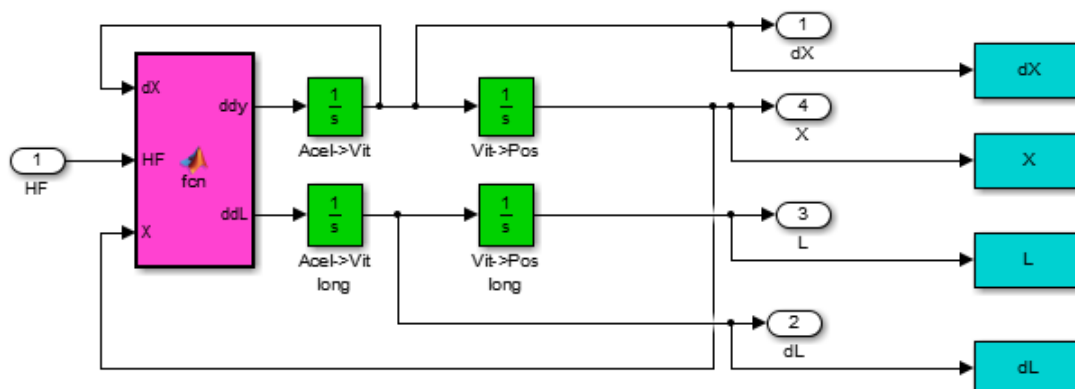


Figura 19 – Modelo implementado no Simulink®

Fonte – Autoria própria.

Onde o bloco de função rosa representa as equações, os quatro blocos em verde, são integradores permanentes para passagem da aceleração para velocidade e da velocidade para a posição. Na simulação do movimento da plataforma, foi imposta uma força de entrada exercida pelos seis atuadores lineares das pernas. A força de entrada consiste em um pulso de amplitude 1N por 0,5 segundos em cada perna. Sendo que por 0,5 segundos o pulso atinge sua amplitude máxima e depois a força é retirada. Utilizando a equação dinâmica é computada posição e velocidade da plataforma móvel correspondente às forças de entrada nas pernas.

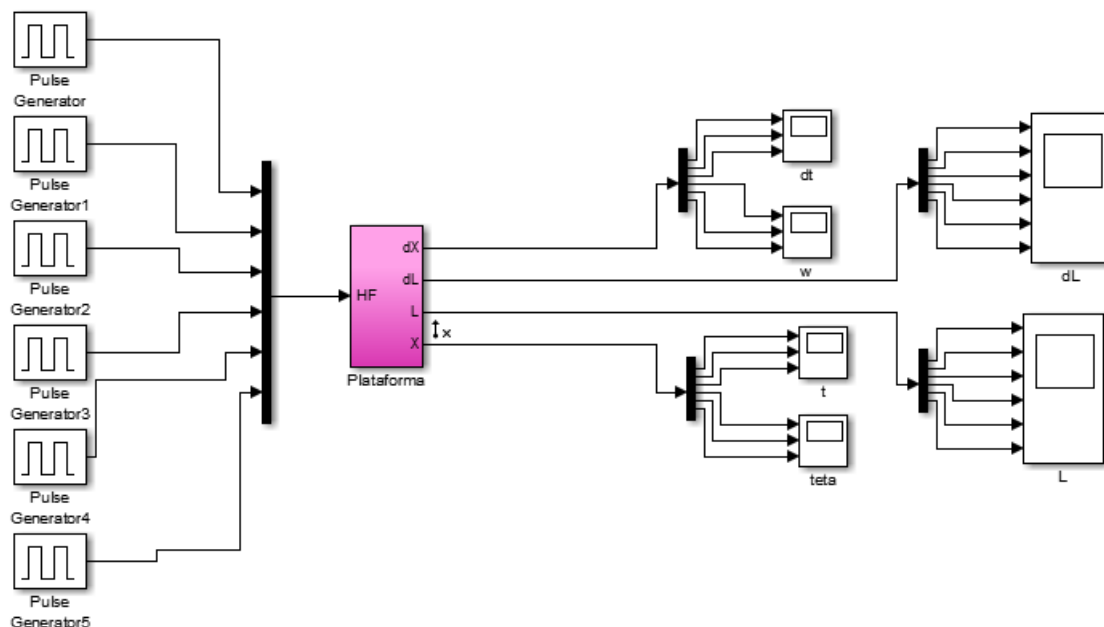


Figura 20 – Malha implementada no Simulink®

Fonte – Autoria própria.

Na figura 20, pode ser visto a malha implementada no Simulink®, onde os 6 geradores de pulso aplicam uma força em forma de pulso na em cada perna da plataforma. Para facilitar a demonstração, a plataforma do manipulador foi deixada inicialmente paralela ao eixo z, como é visualizado na figura 21.

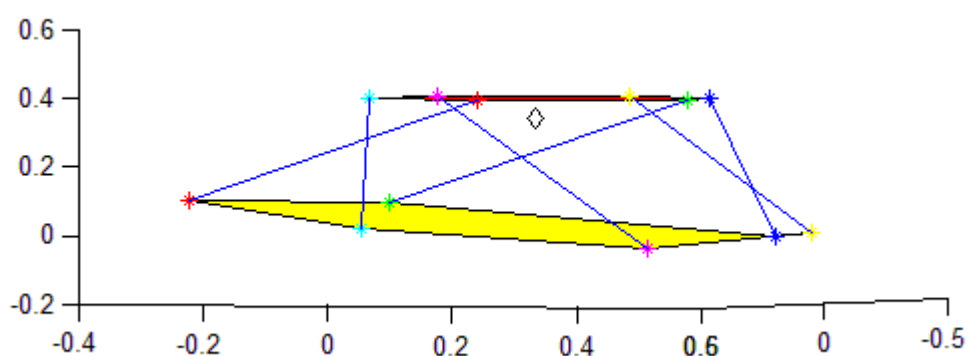


Figura 21 – Plataforma na posição inicial

Fonte – Autoria própria.

Após o pulso de 1 N por 0,5 segundos a plataforma do manipulador apresenta as características que podem ser observadas na figura 22.

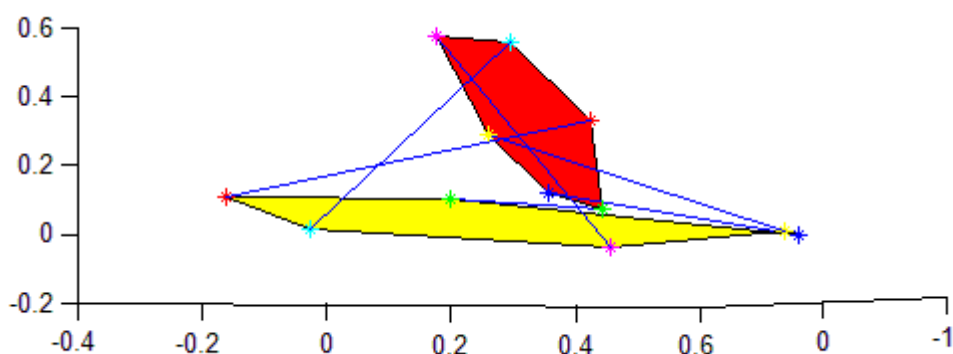


Figura 22 – Plataforma após a aplicação das forças em forma de pulso

Fonte – Autoria própria.

Na figura 23, pode-se visualizar os gráficos das entradas das forças que são aplicadas em cada um dos 6 atuadores, pelos geradores de pulso.

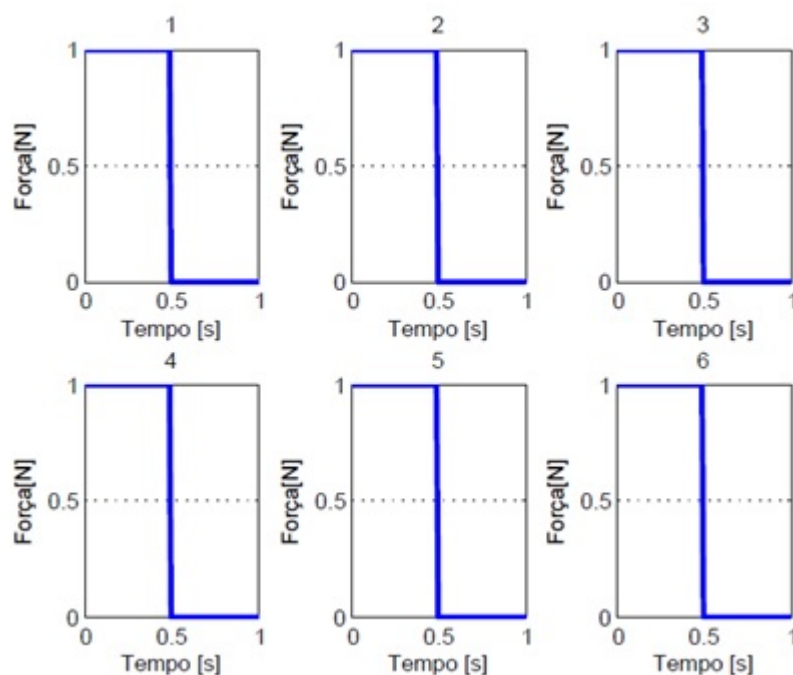


Figura 23 – Forças aplicadas em cada um dos seis atuadores

Fonte – Autoria própria.

Em seguida, na figura 24, é apresentado os gráficos dos deslocamentos para cada uma das 6 pernas do manipulador, durante a aplicação da força.

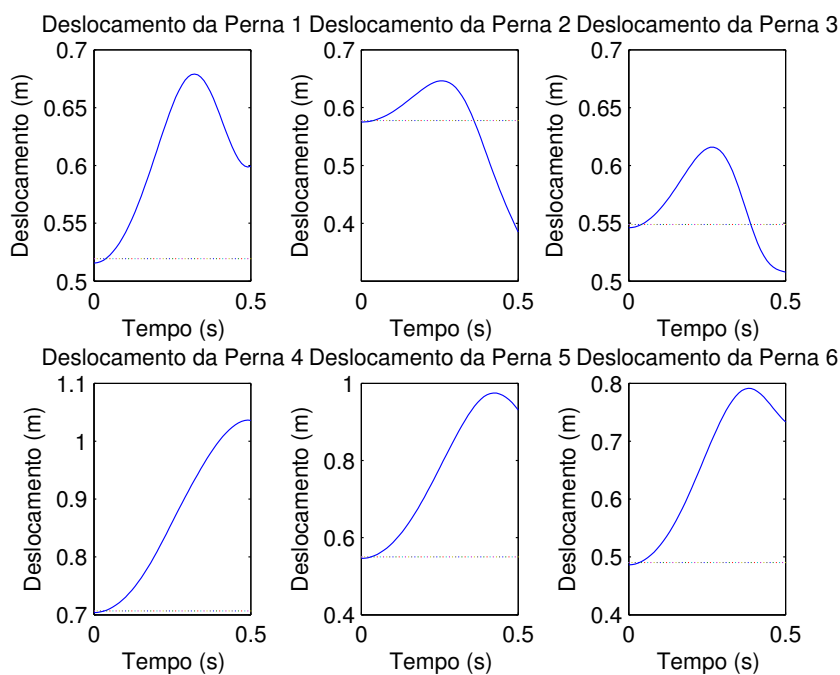


Figura 24 – Gráfico do deslocamento de cada perna

Fonte – Autoria própria.

Então pode-se observar os gráficos, na figura 25, que representa a velocidade de cada perna do manipulador.

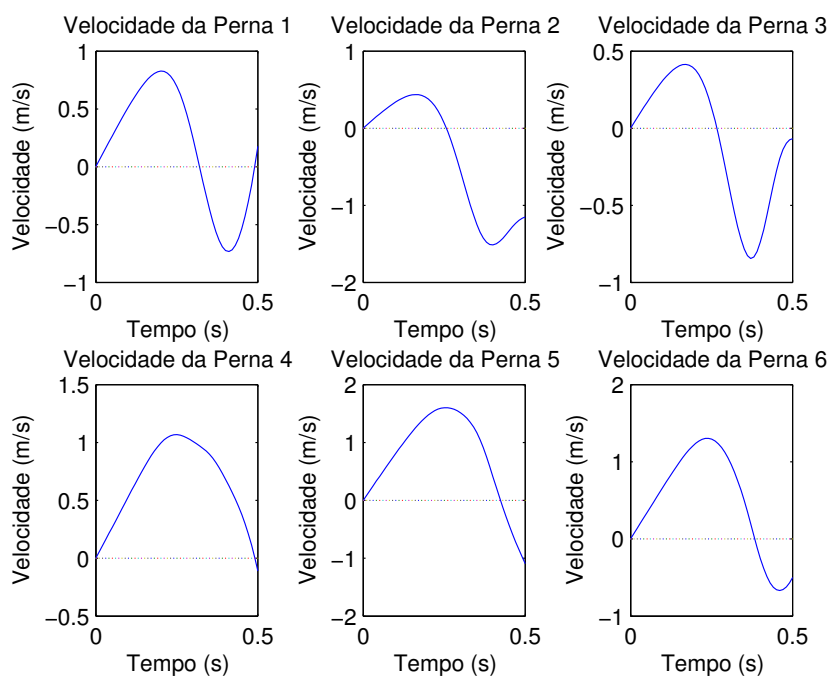


Figura 25 – Gráfico velocidade das pernas durante a aplicação das forças

Fonte – Autoria própria.

Também foi obtido os deslocamentos lineares e angulares do centro de gravidade (CG) da plataforma de Stewart-Gough durante a aplicação da força de 1N em forma de pulso durante 0,5 segundos, que estão representados na figura 26.

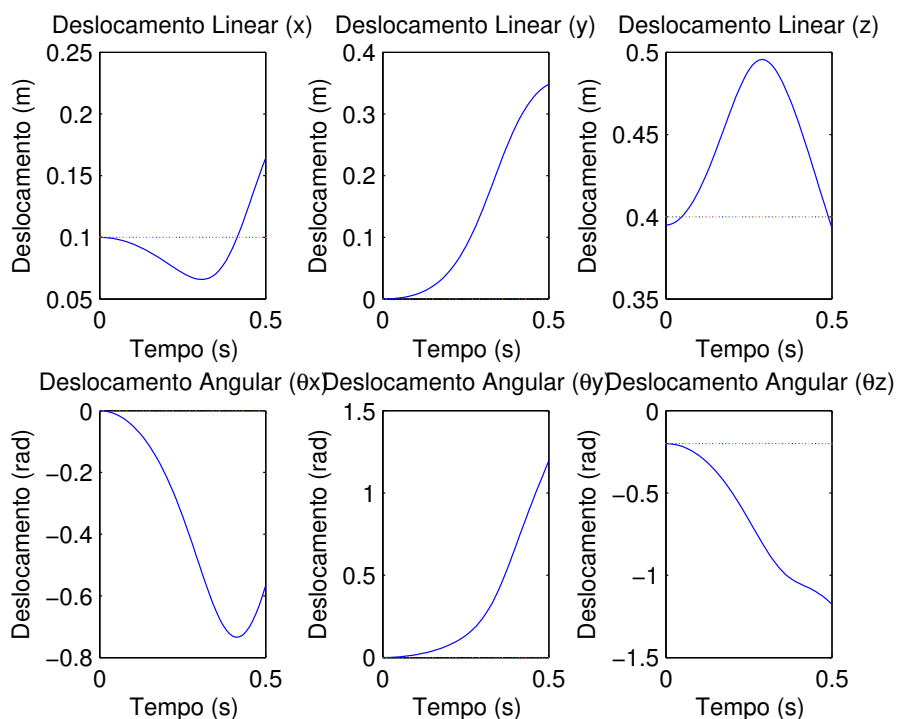


Figura 26 – Gráfico do deslocamento lineares e angulares do CG do manipulador durante a aplicação das forças

Fonte – Autoria própria.

Por fim, na figura 27 tem-se as variações das velocidades lineares e angulares nos respectivos eixos, que são desenvolvidas pelo centro de gravidade da plataforma de Stewart-Gough no momento em que é aplicada a força durante 0,5 segundos.

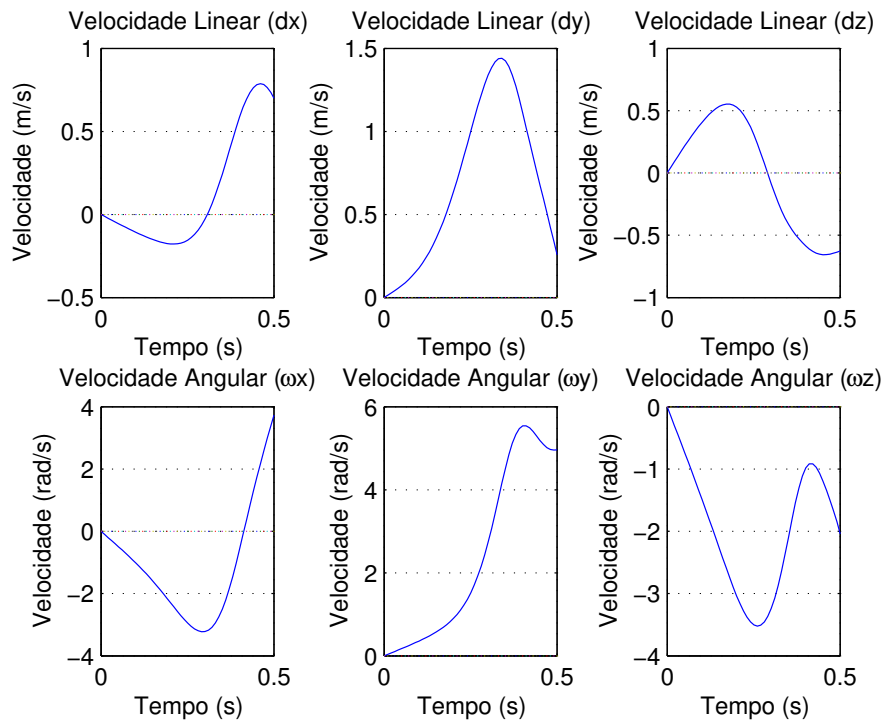


Figura 27 – Gráfico das velocidades lineares e angulares do manipulador durante a aplicação das forças

Fonte – Autoria própria.

Com os resultados obtidos através da simulação, pode-se observar que de acordo com a terceira lei de Newton, ou o Princípio da Ação e Reação, que com a aplicação de 1 N de força no formato de pulso durante 0,5 segundo em cada uma das seis pernas da plataforma, a mesma apresenta como reação, um deslocamento que parte da posição inicial da plataforma para a posição final meio segundo depois. Com a velocidade é visto que a plataforma parte do repouso para uma velocidade durante o tempo em que o pulso é gerado.

5.2 CONTROLE

As técnicas de controle já apresentadas anteriormente foram utilizadas para obter os ganhos dos controladores, para assim, atingir um dos objetivos deste estudo, que é o projeto do sistema de controle ótimo do robô, para aplicar e determinar os ganhos do LQR e estabelecer uma avaliação comparativa com o controlador PD em termos da resposta dinâmica do manipulador.

O controlador PD é sintonizado para obter uma resposta estável e sem sobrepasso, assim foram selecionados os parâmetros: $\omega_r = 35 \text{ rad/s}$ e $\xi = 1$, Desta forma

obtiveram-se os ganhos proporcional e derivativo aplicando as expressões apresentadas anteriormente: $k_P = 1225$ e $k_D = 35$.

O LQR foi sintonizado de modo a satisfazer características semelhantes as do controlador PD. Baseado no modelo linearizado para cada junta da Eq.4.17, foram definidas as matrizes do sistema das Eq.4.19 e Eq. 4.20, assim: $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$, $B = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}^T$, $C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}$, $D = \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix}$. Para realizar a sintonia do controlador e definir as matrizes de ponderação dos estados e do LQR devem ser definidas Q e R da Eq.4.25, após diversas simulações chegou-se aos valores: $Q = \begin{bmatrix} 160000 & 0 \\ 0 & 253 \end{bmatrix}$ e $R = \begin{bmatrix} 0, 1 \end{bmatrix}$. Consequentemente, foram obtidos os ganhos do controlador $k_P = 1264$ e $k_D = 71$.

Na Fig. ?? pode-se observar a trajetória circular de referência no espaço cartesiano para a plataforma móvel, utilizando está trajetória são avaliados os controladores LQR e PD.

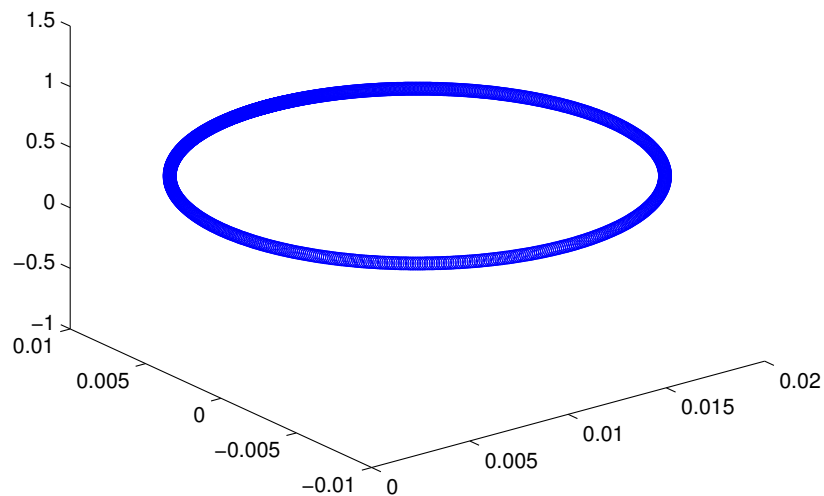


Figura 28 – Rastreamento da trajetória.

Fonte – Autoria própria.

A Fig. 29 mostra o erro do rastreamento no espaço das juntas para as duas estratégias de controle PD e LQR, respectivamente. Pode-se observar que o erro de rastreamento de ambos controladores apresentam um resultado semelhante. Pelo fato das duas técnicas de controle, que foram utilizadas, gerarem ganhos relativamente próximos que não tiveram uma diferença considerável no resultado da simulação do erro rastreamento do manipulador para a trajetória estabelecida.

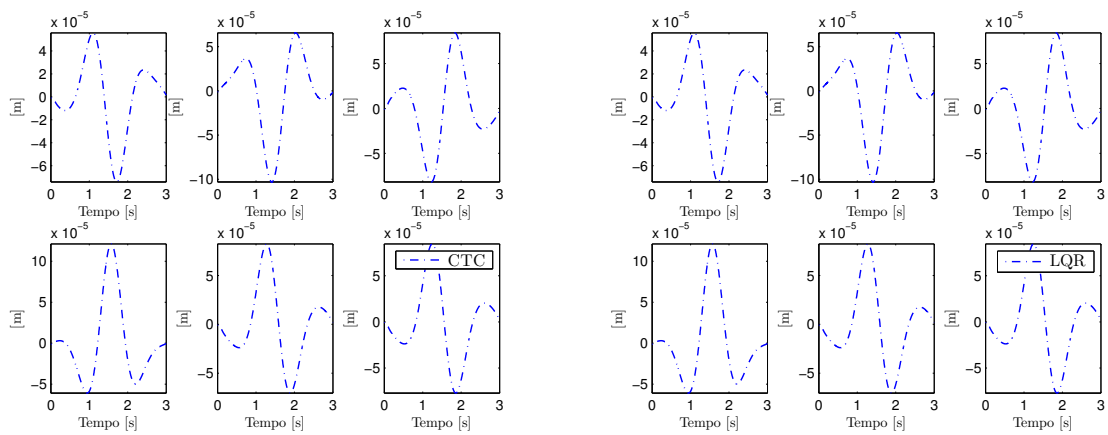


Figura 29 – Erro junta para o rastreamento de uma trajetória circular para o controlador PD (esquerda) e o LQR (direita).

Fonte – Autoria própria.

A Figura 30 apresenta o comportamento das forças, em newton, dos seis atuadores através do uso das técnicas de controle PD e LQR para o rastreamento da trajetória estabelecida, que pode ser observada na Figura 30. Em ambos os casos, os controladores apresentam resultados equivalentes, essas respostas se devem principalmente ao fato de os ganhos obtidos para os dois métodos de controle, PD e LQR, embora satisfatórios, não apresentarem grande efeito para a diferenciação dos resultados.

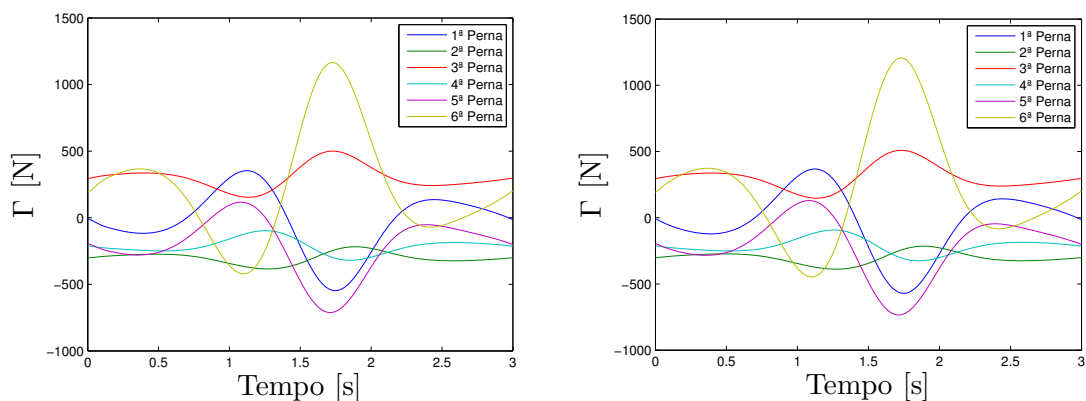


Figura 30 – Rastreamento de uma trajetória utilizando os controladores PD e LQR, respectivamente.

Fonte – Autoria própria.

Outra simulação que foi realizada é a reação à uma perturbação quando a plataforma móvel encontra-se em uma posição fixa $p = [0 \ 0 \ 0,395m \ 0 \ 0 \ 0]^T$ e é aplicada uma carga de na direção z .

Foi introduzida uma força de 5N na plataforma móvel com uma entrada de grau. Como pode ser visto na figura 31, para os dois métodos de controle, onde o gráfico da esquerda representa o PD e o da direita LQR. Consegue se observar que depois de 1,5 segundos é aplicada a força e de acordo com os controles PD e LQR a plataforma móvel é estabilizada novamente para sua posição inicial. Ambos apresentam comportamento semelhantes, porque os ganhos obtidos através do uso das técnicas de controle não impactaram em uma grande diferença no resultado.

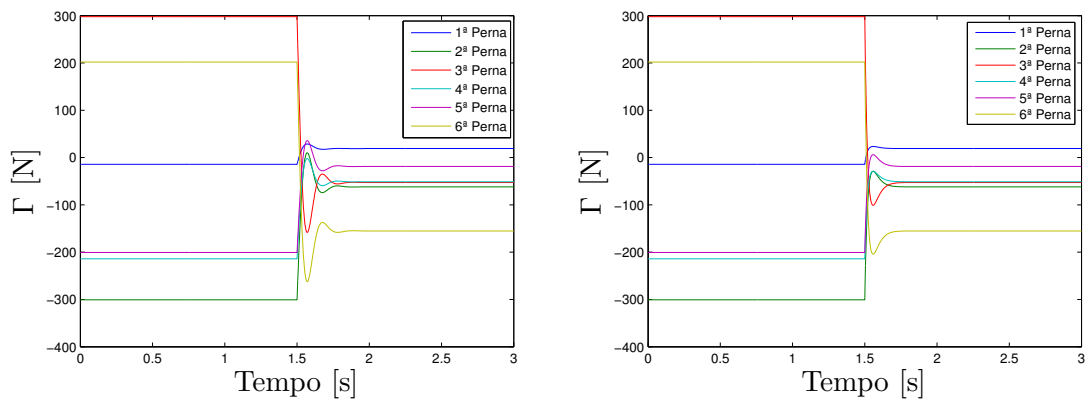


Figura 31 – Regulador de uma perturbação (PD e LQR).

Fonte – Autoria própria.

6 CONCLUSÃO

Foi apresentado neste trabalho uma revisão da literatura referente a trabalhos já realizados sobre robôs paralelos, em especial trabalhos sobre a cinemática e dinâmica, sua modelagem, simulações, singularidades e o controle de manipuladores paralelos, mas especialmente, trabalhos com a plataforma de Stewart-Gough e de seu sistema de controle. Isto permitiu estabelecer as definições básicas dos manipuladores paralelos e a importância da modelagem no desenvolvimento de leis de controle.

Depois foi realizada a modelagem cinemática e dinâmica da plataforma de Stewart-Gough. Sendo fundamental para definir as equações para a implementação computacional com a ajuda do software Matlab/Simulink[®]. As simulações tornaram possível a validação do modelo obtido, tal como, o estudo do comportamento dinâmico do manipulador a partir de forças impostas em cada uma das seis pernas do manipulador.

Após as simulações dinâmicas, foi realizado o projeto do controlador da Plataforma Stewart-Gough, utilizando o controlador PD, juntamente com as técnicas de controle CTC e LQR, que foram implementadas computacionalmente para o rastreamento de posição e reação a uma perturbação da plataforma de Stewart-Gough. Foi fundamental utilizar o modelo completo computacional da plataforma de Stewart-Gough para o projeto dos controladores.

Ambas as técnicas de controle foram implementadas com sucesso e os resultados indicaram que o desempenho dos controladores LQR e CTC foram semelhantes, por apresentarem os ganhos do controlador próximos. Para eventuais trabalhos futuros pode-se aplicar outras técnicas para o controle ótimo da plataforma de Stewart-Gough. Ou também, utilizar as técnicas de otimização em outros manipuladores.

REFERÊNCIAS

- ACUÑA, H. G. **Projeto Mecatrônico De Uma Plataforma Stewart Para Simulação Dos Movimentos Nos Navios**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ, Brasil, 2009.
- ARAI, T. *et al.* Design, analysis and construction of a prototype parallel link manipulator. In: IEEE. **Intelligent Robots and Systems' 90.'Towards a New Frontier of Applications', Proceedings. IROS'90. IEEE International Workshop on**. [S.l.], 1990. p. 205–212.
- BENNEHAR, M. *et al.* A new revised desired compensation adaptive control for enhanced tracking: application to ra-pkms. **Advanced Robotics**, Taylor & Francis, v. 30, n. 17-18, p. 1199–1214, 2016.
- CAR-D. 2016. Disponível em: <<http://www.car-d.fr/>>. Acesso em: 16-07-2016.
- CECCARELLI, M.; OTTAVIANO, E.; GALVAGNO, M. A 3-dof parallel manipulator as earthquake motion simulator. In: IEEE. **Control, Automation, Robotics and Vision, 2002. ICARCV 2002. 7th International Conference on**. [S.l.], 2002. v. 2, p. 944–949.
- CRAIG, J. J. **Robótica**. 3. ed. São Paulo: Pearson, 2012.
- Cruden. 2016. Disponível em: <<http://http://www.cruden.com/>>. Acesso em: 25-07-2016.
- Daimler-Benz. 2016. Disponível em: <<https://www.daimler.com/en/>>. Acesso em: 25-07-2016.
- DASGUPTA, B.; MRUTHYUNJAYA, T. S. Closed-form dynamic equations of the general stewart platform through the newton-euler approach. **Mechanism and Machinery Theory**, v. 33, n. 7, p. 993–1012, 1998.
- DAVLIAKOS, I.; PAPADOPOULOS, E. Model-based position tracking control for a 6-dof electrohydraulic stewart platform. **Mediterranean Conference on Control & Automation**, p. 1–6, 2007.
- FERREIRA, A. B. d. H. **Novo dicionário da língua portuguesa**. [S.l.]: Nova Fronteira, 1986.
- GHOBAKHLOO, A.; EGHTEHAD, M.; AZADI, M. Position control of a stewart-gough platform using inverse dynamics method with full dynamics. **9th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control**, p. 50–55, 2006.
- GOUGH, V.; WHITEHALL, S. Universal tyre test machine. In: **Proc. FISITA 9th Int. Technical Congress**. [S.l.: s.n.], 1962. p. 117–137.
- GUO, H.; LI, H. Dynamic analysis and simulation of a six degree of freedom stewart platform manipulator. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science**, SAGE Publications, v. 220, n. 1, p. 61–72, 2006.

GUO, H. *et al.* Cascade control of a hydraulically driven 6-dof parallel robot manipulator based on a sliding mode. **Control Engineering Practice**, Elsevier, v. 16, n. 9, p. 1055–1068, 2008.

HE, W. *et al.* Adaptive neural impedance control of a robotic manipulator with input saturation. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems**, IEEE, v. 46, n. 3, p. 334–344, 2016.

KILARU, J. *et al.* Optimal design of parallel manipulators based on their dynamic performance. In: **Proceedings of the 14th IFToMM World Congress**. [S.l.: s.n.], 2015. p. 406–412.

Kuka-Robotics. 2016. Disponível em: <<http://www.kuka-robotics.com/>>. Acesso em: 15-07-2016.

LARA-MOLINA, F. A. **Ambiente de Simulação de Manipuladores Paralelos: Modelagem, Simulação e Controle de uma Plataforma Stewart**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, Brasil, 2008.

LARA-MOLINA, F. A.; ROSÁRIO, J. M.; DUMUR, D. Robust generalized predictive control of stewart-gough platform. In: **Robotics Symposium, 2011 IEEE IX Latin American and IEEE Colombian Conference on Automatic Control and Industry Applications (LARC)**. [S.l.: s.n.], 2011. p. 1–6.

LEE, S.-H. *et al.* Position control of a stewart platform using inverse dynamics control with approximate dynamics. **Mechatronics**, Elsevier, v. 13, n. 6, p. 605–619, 2003.

LI, Y.; XU, Q. Kinematic analysis and design of a new 3-dof translational parallel manipulator. **Journal of Mechanical Design**, American Society of Mechanical Engineers, v. 128, n. 4, p. 729–737, 2006.

LI, Y.-W. *et al.* Inverse dynamics and simulation of a 3-dof spatial parallel manipulator. In: IEEE. **Robotics and Automation, 2003. Proceedings. ICRA'03. IEEE International Conference on**. [S.l.], 2003. v. 3, p. 4092–4097.

LIU, M.; LI, C.; LI, C. Dynamics analysis of the gough-stewart platform manipulator. **IEEE Transactions on Robotics and Automation**, v. 16, n. 1, p. 94–98, 2000.

LOPES, A. M. Dynamic modeling of a stewart platform using the generalized momentum approach. **Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation**, Elsevier, v. 14, n. 8, p. 3389–3401, 2009.

MARTINS, J. *et al.* Approaches for dynamic modelling of flexible manipulator systems. **IEE Proceedings-Control Theory and Applications**, IET, v. 150, n. 4, p. 401–411, 2003.

MERLET, J.-P. **Parallel robots**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2006. v. 128.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

STEWART, D. A platform with six degrees of freedom. **Proceedings of the institution of mechanical engineers**, SAGE Publications, v. 180, n. 1, p. 371–386, 1965.

TSAI, L.-W. Solving the inverse dynamics of a stewart-gough manipulator by the principle of virtual work. **Journal of Mechanical design**, American Society of Mechanical Engineers, v. 122, n. 1, p. 3–9, 2000.

ANEXO A – PUBLICAÇÕES DERIVADAS DESTE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

- Controle de um Movimento de um Manipulador Paralelo utilizando Controle Ótimo (IX CONEM);
- Modelagem Dinâmica do Manipulador Plataforma Stewart-Gough (V SMNC);
- Análise Dinâmica de um Robô Paralelo com seis graus de liberdade (XXIII CREEM);
- Controle Ótimo de Reação de um manipulador completamente paralelo (V SI-PEM);
- Controle Ótimo de posição de um robô paralelo (18º SICT FATEC).