



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ARTHUR ANTUNES MONTEIRO MOURA

**OTIMIZAÇÃO DE UM ROBÔ ARTICULADO BASEADO NO MECANISMO DE  
THEO JANSEN**

Recife

2018

ARTHUR ANTUNES MONTEIRO MOURA

**OTIMIZAÇÃO DE UM ROBÔ ARTICULADO NO MECANISMO BASEADO EM  
THEO JANSEN**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, junto ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco.

**Área de Concentração:** Robótica

**Orientador:** Prof. Dr. Justo Emilio Alvarez Jácomo

Recife

2018

Catálogo na fonte  
Bibliotecária Maria Luiza de Moura Ferreira, CRB-4 / 1469

M929o Moura, Arthur Antunes Monteiro.  
Otimização de um robô articulado baseado no mecanismo de Theo Jansen / Arthur Antunes Monteiro Moura - 2018.  
72 folhas, il., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Justo Emilio Alvarez Jácomo.

TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Departamento de Graduação em Engenharia Mecânica, 2018.  
Inclui Referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Mecanismos. 3. Theo Jansen. 4. Otimização.  
5. Algoritmo genético. 6. Robôs articulados com pernas. I. Jácomo, Justo Emilio Alvarez (Orientador). II. Título.

UFPE

621 CDD (22. ed.)

BCTG/2018-491



Universidade Federal de Pernambuco  
Departamento de Engenharia Mecânica  
Centro de Tecnologia e Geociências- CTG/EEP



ATA DE SESSÃO DE DEFESA DE  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO - TCC2

Aos doze dias do mês dezembro do ano de dois mil e dezoito, às 14:00, na sala de Reunião do DEMEC do Centro de Tecnologia e Geociências da UFPE, reuniu-se a banca examinadora para a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, intitulado: **OTIMIZAÇÃO DE UM ROBÔ ARTICULADO BASEADO NO MECANISMO DE THEO JANSEN**, elaborado pelo aluno **Arthur Antunes Monteiro Moura**, matrícula 089.367.564-43, composta pelo Prof. **Justo Emilio Alvarez-Jácobo** (Orientador), Prof. **João Paulo Cajueiro** (examinador 1) e Prof. **João Marcelo Teixeira** (examinador 2). Após a exposição oral, o candidato foi argüido pelos componentes da banca que em seguida reuniram-se reservadamente, e deliberaram pela \_\_\_\_\_ (*aprovação/reprovação*) do candidato no Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica da UFPE, atribuindo-lhe à monografia a média \_\_\_\_\_ (\_\_\_\_\_). Para constar, redigi a presente Ata, aprovada por todos os presentes, que vai assinada por mim e pelos demais membros da banca.

Orientador: Prof. **Justo Emilio Alvarez Jácobo** - Nota: \_\_\_\_\_  
DEMEC/UFPE

Assinatura: \_\_\_\_\_

Examinador 1: Prof. **João Paulo Cajueiro** -DEMEC/UFPE Nota: \_\_\_\_\_

Assinatura: \_\_\_\_\_

Examinador 2: Prof. **João Marcelo Teixeira** -DEE/UFPE Nota: \_\_\_\_\_

Assinatura: \_\_\_\_\_

Recife, 12 de Dezembro de 2018

\_\_\_\_\_  
José Maria A. Barbosa  
Coordenador de Trabalho de Conclusão de Curso – TCC2  
Curso de Graduação em Engenharia Mecânica – CTG/EEP-UFPE

## **AGRADECIMENTOS**

Ao professor Justo, pela oportunidade, disposição e confiança em mim e no presente trabalho. Agradeço pela compreensão, apoio, conversas sinceras e questionamentos que abriram mente.

Aos meus amigos, que forneceram feedbacks e material de apoio para escrever esse trabalho. Aos membros do Movimento Empresa Júnior, que mostraram que colaboração é essencial para avançarmos.

A minha família, por sempre acreditar em mim.

## RESUMO

Com o avanço da tecnologia, os robôs estão cada vez mais presentes não apenas no ambiente de trabalho, mas como soluções do dia-a-dia. Algumas das demandas das novas tecnologias é a utilização de robôs como solução de resgate em ambientes atingidos por desastres (naturais ou impostos pelo homem) e a exploração espacial. Neste trabalho, foram avaliadas as formas de locomoção de robôs descritas na literatura para encontrar qual solução permitiria o movimento capaz de superar obstáculos e associar baixos custos de produção e controle. Nesse sentido, foi optado por otimizar o mecanismo de Theo Jansen, já consolidado na literatura, para diversos tipos de movimento. Também foram definidos objetivos para a realização de movimento desejado e estudadas diversas formas de otimização. Os objetivos definidos foram de ter o máximo de avanço horizontal (superando obstáculos horizontais, como crateras), o máximo de avanço vertical (superando obstáculos verticais, como objetos e desníveis) e melhorar a estabilidade (máximo de pontos de contato com o solo). Tal otimização foi feita através de Algoritmo Genético. Foi utilizada a ferramenta solver do software Microsoft Excel 2017 para cálculos e otimização e o software online Geogebra para representação 2D do sistema. Os resultados do projeto mostraram ser, com razoável custo computacional, possível projetar mecanismos articulados com baixa necessidade de controle para realização de movimento capaz de superar obstáculos.

**Palavras-chave:** Mecanismos. Theo Jansen. Otimização. Algoritmo genético. Robôs articulados com pernas.

## ABSTRACT

With the advances of technology, robots are more and more essentials not only in industry, but also in daily. A few applications of the new tech is the use of robots as rescue solution in disaster zones or in space exploration. In this work, many ways of robotic movement described in literature were evaluated, to find the solution that allow associate the capacity of get over obstacles and have low costs of production and control. In this sense, the Theo Jansen mechanisms, already consolidate, was set to make a range of movements. Also were set objectives to the ideal move and kinds of optimization were studied. The goals were three: maximum horizontal advance (getting over horizontal obstacles, like holes), maximum vertical advance (getting over vertical obstacles, like objects or gradients) and maximum stable (maximum points of contact with the ground). Lastly, genetic algorithm was used. The solver tool of the software Microsoft Excel 2017 was used to calculation e optimization and the online software Geogebra was used to 2D design of the system. The results of the project shows that is possible, with reasonable computer cost, design a low need of control mechanism to do movement capable to get over obstacles.

**Keywords:** Mechanism. Theo Jansen. Optimization. Genetic algorithm. Articulated robots with legs.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Esquema de Queda (E) e Tombamento (D).....	13
Figura 2 –	Esquema de Escorregamento (E) e Fluxo de Detritos/Escoamento (D).....	14
Figura 3 –	Robonaut2 (E); Mars Global Surveyor (C) e Mars Curiosity Rover (D).....	16
Figura 4 –	UNIMATE, um dos primeiros robôs.....	21
Figura 5 –	Robô Shakey.....	22
Figura 6 –	Ciclo de Iteração.....	23
Figura 7 –	Exemplo de robô pessoal, robô de brinquedo BB8, da Disney.....	23
Figura 8 –	Exemplo de robô de campo, robô Curiosity, responsável pela exploração de Marte.....	24
Figura 9 –	Exemplo de robô industrial, robô de logística da Amazon.....	24
Figura 10 –	Drone militar teleoperado.....	25
Figura 11 –	Robô seguidor de linha com Arduino.....	26
Figura 12 –	Robôs autônomos jogando futebol.....	26
Figura 13 –	Robô Chico Mendes.....	17
Figura 14 –	Classificação dos robôs de acordo com sua anatomia.....	28
Figura 15 –	Mecanismos de locomoção em sistemas biológicos.....	29
Figura 16 –	Potência imposta pela velocidade em diversos sistemas de locomoção.....	30
Figura 17 –	Exemplos de pernas com três graus de liberdade.....	31
Figura 18 –	Caminhar de robô com quatro patas, com sincronismo par a par..	33
Figura 19 –	Ciclo de Movimento de um passo em um robô de mecanismo com um grau de liberdade.....	33
Figura 20 –	Mecanismo de Theo Jansen.....	34
Figura 21 –	Modelo proposto por Komada e Wagatsuma, com o ponto fixo de suporte da barra ternária móvel.....	36
Figura 22 –	Protótipo de mecanismo com barras de dimensões variáveis.....	36
Figura 23 –	Principais ramos da Inteligência Artificial.....	41
Figura 24 –	Diagrama de fluxo de algoritmo genético.....	44
Figura 25 –	Problema da Mochila.....	45
Figura 26 –	Eixos de referência.....	47

Figura 27 –	Manivela (r).....	47
Figura 28 –	Barra L1.....	48
Figura 29 –	Barras L2, L3 e L4.....	49
Figura 30 –	Barras L5 e L6.....	50
Figura 31 –	Barra L7 e L8.....	51
Figura 32 –	Paralelogramo CDEF.....	51
Figura 33 –	Barra L9 e L10.....	52
Figura 34 –	Ambiente do Solver do Excel para inserir condições e restrições, assim como o método de solução.....	58
Figura 35 –	Ambiente do Solver para inserir condições da técnica de otimização evolucionária (Evolutionary).....	58
Figura 36 –	Representação do mecanismo e do movimento modelado no Geogebra.....	61
Figura 37 –	Representação do movimento do ponto G no Excel.....	61
Figura 38 –	Montagem modelo simplificado.....	62
Figura 39 –	Barra R1 (E) e Barra L1 (D).....	63
Figura 40 –	Barra Tripla L2L3L4 (E) e Barra L5 (D).....	64
Figura 41 –	Barra L6 (E) e Barra L7 (D).....	64
Figura 42 –	Barra Tripla L8L9L10 (E) e Engrenagem (D).....	64
Figura 43 –	Suporte Perna (E) e Suporte Robô (D).....	65
Figura 44 –	Protótipo em acrílico.....	65

## LISTA DE FIGURAS

Tabela 1 –	Tipos de Deslizamento de Terra.....	12
Tabela 2 –	Principais casos de deslizamentos no Brasil.....	14
Tabela 3 –	Robôs utilizados na exploração espacial.....	16
Tabela 4 –	Classificação de robôs de acordo com sua forma de controle.....	25
Tabela 5 –	Estado da arte de otimizações no mecanismo de Theo Jansen.....	35
Tabela 6 –	Análise histórica de contribuições a otimização de problemas matemáticos.....	37
Tabela 7 –	Técnicas de Aprendizado de Máquina.....	41
Tabela 8 –	Itens do problema da mochila.....	45
Tabela 9 –	Números Mágicos de Theo Jansen.....	54
Tabela 10 –	Inputs para otimização.....	56
Tabela 11 –	Dimensões e Variação padrão.....	57
Tabela 12 –	Parâmetros encontrados através do Algoritmo Genético.....	59
Tabela 13 –	Resultado dos objetivos da otimização.....	59
Tabela 14 –	Descrição das Peças utilizadas na montagem.....	63

## SUMÁRIO

1	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	12
1.1	PROBLEMÁTICA.....	12
1.2	TEMA.....	13
2	<b>JUSTIFICATIVA.....</b>	14
2.1	DESLIZAMENTOS DE TERRA.....	14
2.2	EXPLORAÇÃO ESPACIAL.....	17
3	<b>OBJETIVOS.....</b>	20
3.1	OBJETIVO GERAL.....	20
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	20
4	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	21
4.1	ROBÓTICA.....	21
4.1.1	<b>História da Robótica Móvel.....</b>	21
4.1.2	<b>Tipos de Robôs Móveis.....</b>	24
4.1.2.1	Aplicabilidade.....	25
4.1.2.2	Controle.....	27
4.1.2.3	Anatomia.....	28
4.2	LOCOMOÇÃO.....	30
4.2.1	<b>Robôs com pernas.....</b>	32
4.2.1.1	Robô com duas pernas.....	34
4.2.1.2	Robô com quatro ou mais pernas.....	35
4.3	MECANISMO DE THEO JANSEN.....	36
4.3.1	<b>Estado da arte em otimizações de Theo Jansen.....</b>	36
4.4	ALGORITMOS DE OTIMIZAÇÃO.....	39
4.4.1	<b>Aprendizado de Máquina.....</b>	42
4.4.2	<b>Algoritmos Evolutivos.....</b>	44
5	<b>CÁLCULOS E OTIMIZAÇÃO.....</b>	49
5.1	COORDENADAS DO SISTEMA.....	51
5.2	FUNÇÃO PRINCIPAL.....	54
5.3	OTIMIZAÇÃO DO MOVIMENTO.....	55
5.3.1	<b>Restrições.....</b>	57
5.3.2	<b>Entradas da Otimização.....</b>	58
5.4	RESULTADOS.....	62

6	<b>DESIGN DO MODELO.....</b>	65
7	<b>CONCLUSÕES.....</b>	69
8	<b>PERSPECTIVAS.....</b>	70
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	71

## **1 INTRODUÇÃO**

Nos tempos modernos, diversos grupos estão sendo atraídos pelo desenvolvimento de robôs articulados que possuem pernas ou patas, uma vez que essa composição permite que a locomoção seja adaptável a diversos ambientes, superando obstáculos e percorrendo ambientes irregulares. No entanto, os projetos de robôs articulados são complexos, devendo considerar diversas interações internas (centro de gravidade, juntas de movimento e etc.) e externas (forças que afetem o equilíbrio - como vento - e variações de terreno). Um projeto eficiente deve considerar informações obtidas por diversos sensores (ex. acelerômetros, leitores de ambientes) e capaz de controlar o movimento através de juntas e articulações, permitindo o deslocamento do robô de acordo com o ambiente e trajetória desejados (WOLF et al, 2009).

### **1.1 PROBLEMÁTICA**

A robótica está avançando na procura por uma maior autonomia e inteligência: sistemas complexos com diversos níveis de controle que verificam o próprio funcionamento, percebem o ambiente e corrigem suas próprias tarefas, sem necessidade da interferência humana. São utilizados em atividades variadas, do dia-a-dia, das residências aos laboratórios de alta precisão, dos carros sem motorista à exploração espacial, sua presença no futuro da humanidade irá além da imaginação.

Os robôs tiveram, como um dos princípios de sua concepção, a ideia de substituir o homem em algumas atividades, principalmente cíclicas ou repetitivas, de modo mais preciso e mais rápido. Com o avanço da tecnologia, os robôs também foram inseridos em ambientes de resgate, substituindo e auxiliando na preservação de vidas. Exemplo disso foi o ocorrido em 2011, após terremotos e tsunamis atingirem o Japão. As catástrofes em sequência vitimaram milhares de vítimas, mas o resgate foi otimizado e diversas vidas foram salvas pelo trabalho de robôs, que detectaram e extraíram pessoas de ambientes impróprios que colocariam também em risco a vida dos agentes de resgate. (TERRA, 2011).

No entanto, nem todos os países possuem a preparação japonesa. Tal tecnologia é cara e requer investimentos, além de anos de pesquisa. Diante disso, é necessário que se economize recursos e torne a tecnologia acessível. Fazendo-o, será possível implementar soluções nos lugares mais diversos e permitir que mais pessoas sejam atendidas pela mesma. Nessa situação,

surge a pergunta: Como modelar e otimizar o movimento de um robô articulado levando em consideração limitações externas, e utilizando o mínimo de controle e poucos recursos?

Além disso, outro uso muito frequente de robôs articulados é na exploração espacial. Esses robôs deverão estar preparados para superar crateras e detritos, permitindo que o robô continue avançando para realizar a missão ao qual está designado. Porém, a exploração espacial ainda é um privilégio dos poucos países que podem fornecer tecnologia para a fabricação destes robôs, e que podem enviar robôs ou ter acesso aos dados coletados pelos robôs em campo.

## **1.2 TEMA**

O avanço da robótica também foi o avanço do controle. Existem cada vez mais sensores capazes de interpretar o ambiente, assim como os movimentos possuem cada vez mais graus de liberdade, permitindo ultrapassar maior variedade de obstáculos. Esses sensores e o maior número de graus de liberdade necessitam de maior processamento e algoritmos mais complexos, aumentando também os custos necessários para desenvolver e produzir os robôs.

Indo contra a tendência de aumento de complexidade, o físico neerlandês Theo Jansen estudou por cerca de dez anos estruturas complexas chamadas de strandbeest (do holandês, animais de praia) que possuem apenas um grau de liberdade. O seu interesse era o desenvolvimento de organismos autônomos, providos de movimento, que fossem capazes de evoluir naturalmente. Com menor número de pontos a serem controlados, a necessidade de controle diminui e, portanto, se reduzem os custos computacionais envolvidos com o processo de locomoção (ARTFUTURA, 2005).

Dessa forma, o presente trabalho terá como tema a otimização de um robô baseado no mecanismo de Theo Jansen que seja capaz de atravessar obstáculos baseados em gradientes de altura, assim como superar obstáculos horizontais como buracos, permitindo a navegação robótica em ambientes acidentados e com menor custo computacional possível.

## 2 JUSTIFICATIVA

Existem diversas justificativas para o desenvolvimento de robôs móveis com pernas, sendo esse trabalho motivado principalmente por dois vieses que por mais opostos estejam da realidade do dia-a-dia, são semelhantes no que se diz a utilização de robôs em ambientes onde não é possível enviar pessoas. O primeiro viés são os ambientes de desastres naturais, como por exemplo, locais atingidos por deslizamentos de terra. O segundo seria a exploração espacial.

### 2.1 DESLIZAMENTOS DE TERRA

O deslizamento de terra é definido de modo geral como o movimento de descida do solo, de rochas e de material orgânico, ou de combinações dos mesmos, sob o efeito da gravidade. O movimento ocorre quando há ruptura do material de uma superfície, na qual a maior parte do material se move como uma massa coerente (ou próximo de ser) (HIGHLAND & BOBROWSKY, 2008).

Existem diversos tipos de movimento que descrevem um deslizamento, como queda, envergamento, escorregamento, espalhamento ou escoamento, resumidos na Tabela 1. Para o presente trabalho focaremos nos que atingem regiões urbanas, provocando acidentes até mesmo fatais.

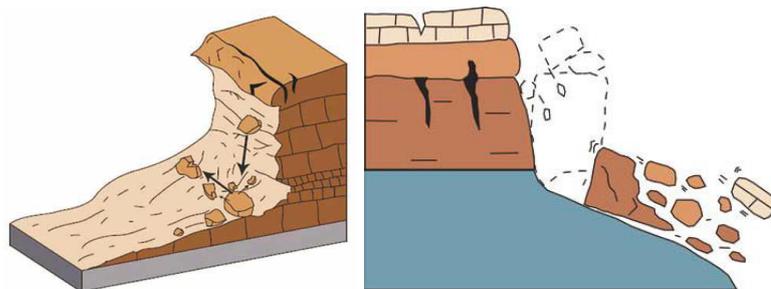
**Tabela 1 - Tipos de Deslizamento de Terra**

<b>Tipo de Deslizamento</b>	<b>Descrição</b>	<b>Imagem</b>
Queda	Se inicia com a separação de solo e/ou rocha de um talude, ao longo de sua superfície, sem que tenha havido necessariamente cisalhamento. Ocorre por todo o globo, principalmente em áreas próximas a rios e litorâneas. O volume de material solto pode variar substancialmente, desde rochas individuais a milhares de metros cúbicos. É caracterizada pela velocidade extrema de deslocamento, que pode ameaçar vidas. As quedas danificam propriedades diretamente abaixo da linha de queda, assim como podem saltar e rolar por grandes distâncias, danificando áreas maiores.	Figura 1
Tombamento	Ocorre quando uma massa de solo ou rocha sofre rotação frontal de um talude (parede rochosa) em torno de um ponto abaixo do seu centro de gravidade. Pode conter rochas, detritos ou outros materiais (orgânicos ou não), que aumentam o alcance do mesmo deslizamento. Ocorre por todo globo, mas em especial regiões de corte de rodovias, cursos de rios e ribeirões com margens íngremes.	Figura 1

Tipo de Deslizamento	Descrição	Imagem
	Sua velocidade varia de extremamente lenta a extremamente rápida, sendo essa última com potencial altamente destrutivo. Sua previsibilidade é dificultada por não haver constante mapeamento de áreas suscetíveis a tombamento.	
Escorregamento	É o movimento de massa de solo ou rocha em um declive devido a cisalhamento. O movimento não é uniforme, aumentando o material deslocado a partir do local da ruptura. A massa do escorregamento se move para fora e/ou para baixo ao longo de uma superfície próxima de plana, podendo progredir por grandes distâncias. É um dos tipos de deslizamentos mais comuns, ocorrendo por todo o globo em diversos tipos de solo ou condições ambientais. Pode variar de pequenas (do tamanho de uma casa) a muito grande (quilômetros de extensão). Sua velocidade também pode variar muito, desde metros por mês a metros por segundo. Em velocidades reduzidas, podem danificar propriedades, tubulações e redes de abastecimento. As maiores velocidades podem até mesmo ameaçar a vida. A chuva é uma das principais causas devido ao encharcamento do solo, mas também pode acontecer devido a erosão, vazamentos de tubulações ou tremores de terra.	Figura 2
Escoamento	O mesmo consiste no movimento espacialmente contínuo, onde a massa se desloca de forma semelhante a um líquido viscoso. Dependendo da água presente a mobilidade pode variar, assim como a evolução do movimento. A forma de movimento rápido da massa em um escoamento, que mistura o solo, rochas e outros materiais com água é chamada de fluxo de detritos. O fluxo é extremamente perigoso, uma vez que sua velocidade é extrema (até 56km/h) e passível de ocorrer sem qualquer tipo de alerta. Existem diversos mapas de riscos de potencial escoamento e formação de fluxos de detritos, podendo ocorrer com frequência em áreas íngremes com chuvas torrenciais, especialmente em áreas desmatadas.	Figura 2

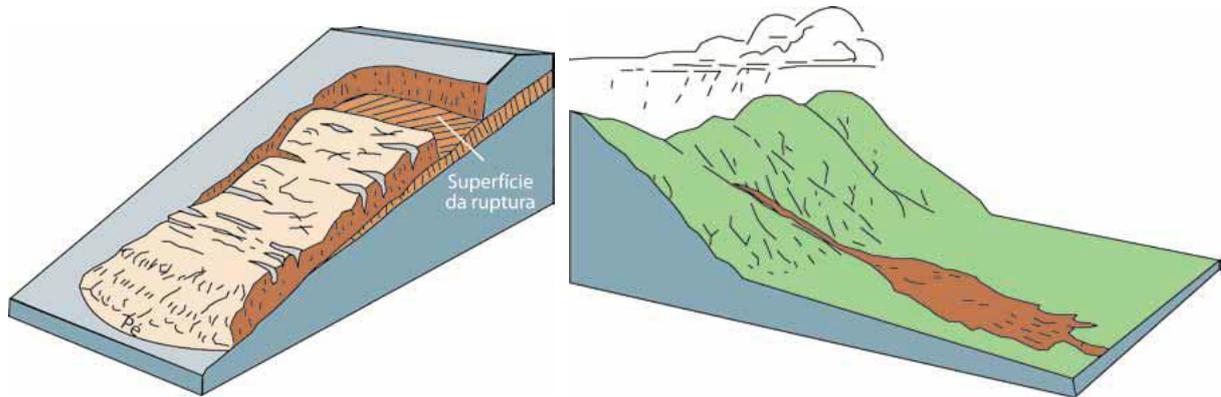
Fonte: Adaptado de Highland & Bobrowsky (2008, p. 10)

**Figura 1 – Esquema de Queda (E) e Tombamento (D)**



Fonte: Highland & Bobrowsky (2008, p. 10 e p.12)

**Figura 2 - Esquema de Escorregamento (E) e Fluxo de Detritos/Escoamento (D)**



Fonte: Highland & Bobrowsky (2008, p. 17 e p. 24)

Deslizamentos possuem efeitos amplamente conhecidos, que variam com o ambiente de ocorrência, assim como a presença ou não de pessoas. Podem afetar estruturas, estradas, ferrovias, redes de abastecimento de água, gás e energia, casa, edifícios e outras construções, assim como podem provocar óbitos.

Para exemplificar as consequências dos deslizamentos em nosso país, se enumera em destaque na Tabela 2 os casos mais marcantes das últimas décadas:

**Tabela 2 - Principais casos de deslizamentos no Brasil**

<b>Data</b>	<b>Local</b>	<b>Ocorrido</b>	<b>Impacto</b>
Maio de 1996	Recife - PE	Deslizamento de terra devido à chuva	49 óbitos
Novembro de 2008	Santa Catarina	Deslizamentos de terra devido a temporais	135 óbitos e milhares de desabrigados
Setembro de 2009	Osasco – SP	Deslizamento de terra destrói casa	5 óbitos da mesma família
Abril de 2010	Rio de Janeiro	Deslizamentos de terra devido a temporais	257 óbitos
Dezembro de 2010	Angra dos Reis – RJ	Deslizamento de terra devido a temporal	53 óbitos
Janeiro de 2011	Rio de Janeiro - RJ	Deslizamentos de terra devido a enchentes	905 óbitos

Fonte: Compilado pelo autor

Vistos os casos, é sensível a urgência não só em mitigar a ocorrência, mas preparar-se para entrar em ação e diminuir o número de vítimas. Nesse aspecto, equipes de resgate colocam-se em risco ao entrar em regiões instáveis em busca de vidas, como o caso do acidente em Sichuan, China, em 2017. Nesse caso, 93 pessoas encontravam-se ainda desaparecidas quando

o gabinete de segurança decidiu suspender as ações por risco de novos deslizamentos (PRESSE, 2017).

Com esse objetivo, cabe aos engenheiros e cientistas pensarem em como utilizar a ciência e a tecnologia como ferramentas de monitoramento, prevenção, mitigação e resgate em situações de desastre. Dever-se-á buscar substituir equipes humanas por robôs, ágeis e seguros, capazes de atuar eficientemente e garantir a segurança das pessoas e seres vivos em áreas de risco.

Quando se trata de atuar sobre terra, existe uma limitação interessante relacionada à forma de se locomover, robôs baseados na utilização de rodas estão limitados a uma superfície quase plana, a condição de poder superar superfícies não planas depende do raio das suas rodas e de como o sistema de rodas foi projetado. Em áreas de risco, principalmente quando se busca sobreviventes às superfícies raramente são planas. Estudar e desenvolver sistemas robóticos que não sejam dependentes do acionamento de uma roda se torna fundamental para o futuro desta aplicação.

## **2.2 EXPLORAÇÃO ESPACIAL**

A exploração espacial é uma outra aplicação importante dos robôs autônomos articulados com pernas. Neste tipo de ambiente, os sistemas robóticos deverão ter a capacidade de navegar em superfícies não-planas, muitas vezes desconhecidas, e ainda garantir a máxima eficiência energética para sobrevivência do sistema e de sua missão.

O ambiente espacial é tido como um dos maiores desafios da robótica. As missões espaciais são arriscadas e os robôs são utilizados para garantir a segurança da mesma. Os robôs são mais baratos, não precisam de descanso ou alimentação (no entanto, precisam de energia, que pode ser obtida através de radiação solar), podem sobreviver a condições extremas de temperatura e radiação e possuem a vantagem de serem descartáveis (não demandam uma missão de retorno à Terra) (NASA, 2017).

Entre os diversos tipos de robôs que participam da exploração espacial, dois podem ser considerados principais: ROV – Remotely Operated Vehicle ou Veículo Remotamente Operado e RMS – Remotely Manipulator System ou Sistema Manipulado Remotamente.

ROV podem ser naves não tripuladas que permanecem em voo, robôs que exploram terrenos enquanto se movimentam ou sondas que entram em contato com corpos extraterrestres e operam a partir de uma posição estacionária. RMS consistem em robôs manipuladores, como

braços robóticos utilizados na montagem de equipamentos ou manipulação de objetos. Para conhecer alguns dos robôs já utilizados em exploração espacial, foi montada a Tabela 3 com exemplos (TORRES et al, 2014).

**Tabela 3 - Robôs utilizados na exploração espacial**

Robô	Descrição	Imagem
Robonaut2	Robô humanoide ajudante, lançado para a estação espacial e resultado de um projeto de 15 anos. Possui funções de reconhecimento visual de objetos, manipulação de objetos e sólidos, trabalho simultâneo com duas mãos. Processa informações de 350 sensores, 4 câmeras de alta resolução e uma câmera infravermelho, além de 49 graus de mobilidade. Possui também duas formas de controle básico, sendo um autônomo e outro remoto.	Figura 3
Mars Global Surveyor	Sonda projetada para orbitar Marte, recolhendo fotos instantâneas. Possui um controle que a permite variar o momento angular em sua trajetória e assim economizar combustível.	Figura 3
Mars Curiosity Rover	Este robô é praticamente um laboratório móvel que pousou em Marte em 2012. Seu sistema de condução consiste em seis rodas associadas a um sistema de propulsão que permite a ultrapassagem de obstáculos de até 65cm.	Figura 3

Fonte: Adaptado de TORRES et al, 2014

**Figura 3 - Robonaut2 (E); Mars Global Surveyor (C) e Mars Curiosity Rover (D)**



Fonte: Robonaut(E); Mars (C) e Experience Curiosity (D)

Todos esses robôs custaram aos seus desenvolvedores (no caso dos exemplos, a NASA) milhões de dólares em investimento. Esse custo elevado exclui diversos países da exploração espacial, assim como limita o número de pesquisas a serem praticadas em solos extraterrestres.

Com essa justificativa, é plausível o desenvolvimento de sistemas mais econômicos, simples e eficientes para esses ambientes.

### **3 OBJETIVOS**

#### **3.1 OBJETIVO GERAL**

O presente trabalho tem como objetivo analisar os tipos de locomoção robótica possíveis de ultrapassar obstáculos em regiões de difícil acessibilidade, otimizando o sistema para permitir vencer obstáculos horizontais e verticais com a máxima eficiência e menor necessidade de controle.

#### **3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Comparação qualitativa das formas de transporte baseada em rodas e em mecanismos articulados.
2. Otimizar o mecanismo de Theo-Jansen considerando a relação entre passo (vertical) e avanço (horizontal) para adaptar-se a diferentes terrenos e obstáculos.
3. Utilização de mecanismos de barras como forma de transporte com menor necessidade de controle computacional.
4. Aproveitar-se de conceitos de aprendizado de máquina para a otimização do movimento robótico.

## 4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 4.1 ROBÓTICA

Segundo o dicionário português Priberam, robô pode ser entendido como o “aparelho capaz de agir de maneira automática numa dada função”, ou seja, máquinas que se movem, manipulam objetos e realizam variedades de trabalhos, quando programadas para tal. Sua ideia nasce ainda na Antiguidade, na Grécia, com Aristóteles. O mesmo disse:

“Se todo instrumento pudesse executar o seu próprio trabalho, obedecendo ou antecipando o que os outros querem... se o tear pudesse tecer e tocar o toque da lira sem uma mão para guiá-los, chefes não precisariam de criados ou escravos”.

Assim, os robôs começaram a ser idealizados como facilitadores, artefatos que pudessem reduzir o trabalho humano permitindo assim a dedicação a tarefas mais nobres e menos laboriosas.

#### 4.1.1 História da Robótica Móvel

O ser humano sempre buscou desenvolver máquinas que simulassem os movimentos biológicos, fossem humanos ou de animais. Os egípcios criaram estátuas com articulações móveis, enquanto os gregos desenvolveram as primeiras marionetes acionadas por polias e pesos.

Já na idade média surgiram os chamados autômatos, que eram, de forma simplificada, bonecos mecânicos acionados por cordas que simulavam atividades, auxiliam na descrição de movimentos. O mais famoso autômato foi o pato mecânico de Jacques de Vaucason, que podia torcer o pescoço, bater asas e engolir e regurgitar alimentos (PIERI, 2002).

No entanto, apenas em 1921 a palavra robótica foi utilizada pela primeira vez no que hoje conhecemos como República Tcheca. Karel Čapek, em sua peça “RUR – *Rossum's Universal Robots*”, descreveu uma máquina que parecia com um ser humano, como robota, que em tcheco significa escravo (PIERI, 2002).

O conceito Robótica, que se refere ao estudo e utilização de robôs, amadureceu com Isaac Asimov, em 1942. Já em seu livro “Eu Robô”, de 1950, aprofundou o conceito e as possibilidades dos mesmos equipamentos, desenvolvendo o que hoje chamamos das três leis da robótica:

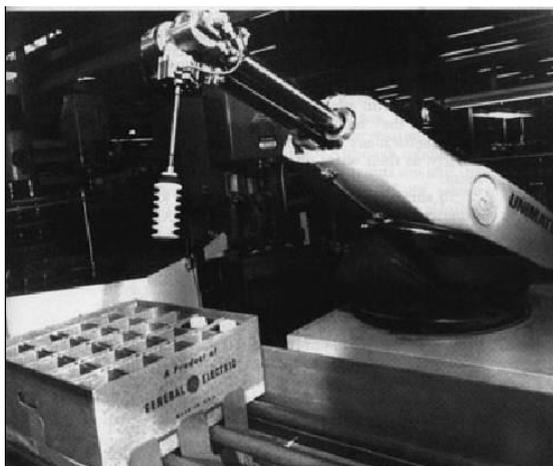
1. Um robô jamais deve causar dano a um ser humano ou, por inação, permitir que um ser humano sofra algum mal;
2. Um robô deve obedecer às ordens que lhe são dadas por seres humanos, exceto quanto essas ordens entrarem em conflito com a primeira lei;
3. Um robô deve proteger sua própria existência, desde que tal proteção não entre em conflito com a primeira ou a segunda lei.

Mais tarde, Asimov acrescentou a famosa Lei Zero, que afirma que um robô não pode causar mal à humanidade ou, por omissão, permitir que a humanidade sofra algum mal.

Também em 1950, Alan Turing, pioneiro da computação e pai da ciência computacional, propôs um teste que determina se uma máquina realmente pode pensar por si mesma de forma inteligente, não seguindo uma programação lógica pré-programada. Para passar no teste, conhecido como Teste de Turing, a máquina deve ser indistinguível de um ser humano (CRUZ, 2013).

Na mesma época, no ambiente industrial, a invenção do transistor permitiu que robôs pudessem ser controlados por computadores, deixando de ser marionetes. Em 1954 surgiu o primeiro braço robótico, o Unimate de George Devol, mostrado na Figura 4. O mesmo, em 1961, foi implementado e automatizou tarefas em uma fábrica da General Motors em Nova Jersey (PSCHEIDT, 2007).

**Figura 4 - UNIMATE, um dos primeiros robôs**

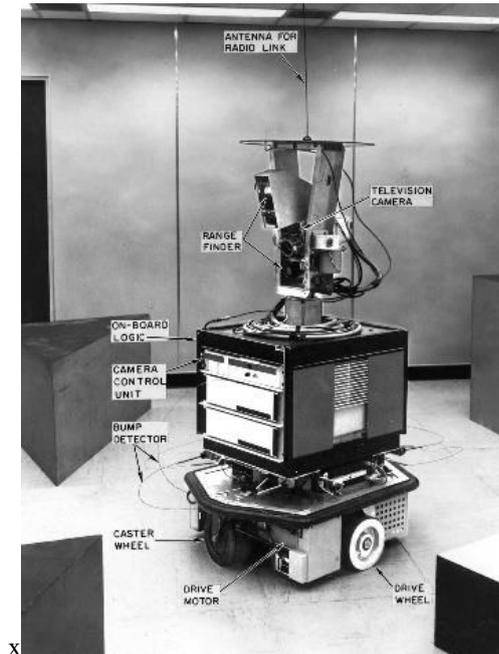


Fonte: My Illionois

Em 1957 a União Soviética lança o satélite “Sputnik”, marcando o início da corrida espacial e impulsionando o desenvolvimento científico e de engenharia por todo o globo. Em 1968 surgiram os robôs móveis, que uniram os conceitos da mecânica com a robótica fixa. Dotar um robô móvel com capacidades de atuar em ambiente dinâmicos parecia inicialmente simples, mas mostrou-se de grande complexidade, mesmo com o avanço de sensores, processamento de imagem e inteligência artificial (PIERI, 2002).

Em 1972 surgiu o Shakey, o primeiro robô móvel controlado por inteligência artificial, desenvolvido no Instituto de Pesquisa de Stanford por Nilsson, mostrado na Figura 5. Seu sistema era controlado por quadrees, estrutura em forma de árvore que é gerada através da decomposição de um ambiente bidimensional pelo refinamento sucessivo das células, para representar o ambiente de grafos e planejar sua trajetória (PIERI, 2002).

**Figura 5 - Robô Shakey**



Fonte: Field Robotics Center (2000)

Na década de 80, Lonzano-Pérez idealizou a existência de “região de incerteza” na modelagem do ambiente, haja visto a existência de obstáculos comuns em ambientes abertos. Ele utilizou-se de grafos de visibilidade para planejar trajetórias, podendo tratar o robô como um simples ponto no espaço de configuração. Na mesma década, Brooks desenvolveu o método freeway, que é resumido como uma modelagem do espaço livre e planejamento da trajetória, mas com restrições na criação dos mapas do ambiente (PSCHEIDT, 2007).

Em 1990, surgiu o projeto MARIE – Mobile Autonomous Robot in Industrial Environment, integrando mapas geométricos e topológicos, utilizando um método hierárquico para navegação, utilizando mapas para encontrar o caminho e sensores para desviar obstáculos (PIERI, 2002).

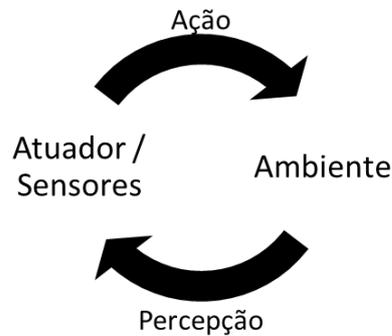
#### **4.1.2. Tipos de Robôs Móveis**

Robô móvel é o nome dado a um equipamento robótico montado sobre uma base não fixa, que age sob comando computacional, equipado com sensores para interação com o ambiente e atuadores para movimentação.

A interação com o ambiente ocorre através de ciclos de percepção e ação. Primeiramente, os sensores capturam informações acerca do ambiente. Essas informações são

processadas e selecionam as ações que devem ser executadas. Os atuadores então são acionados e executam as ações planejadas e calculadas (Figura 6) (PIERI, 2002).

**Figura 6 - Ciclo de Iteração**



Fonte: Elaboração Própria

Tendo o funcionamento básico baseado nas interações descritas acima, existem diversos tipos de robôs móveis. De forma geral, podem ser agrupados em três macro grupos: segundo sua anatomia, segundo seu tipo de controle e segundo sua aplicabilidade.

#### 4.1.2.1 Aplicabilidade

Quanto a sua aplicabilidade, os robôs podem ser divididos de acordo com o campo de atuação, podendo ser Robôs Pessoais, Robôs de Serviço, Robôs de Campo ou Robôs Industriais.

Robôs Pessoais são os que não desenvolvem tarefas específicas, mas interagem com os humanos. É o caso principalmente de brinquedos, como exemplificado na Figura 7.

Robôs de Serviço são utilizados para serviços gerais, trabalhando em ambientes estruturados, mas com certa autonomia, pois processa informações provenientes de sensores para reagir a situações imprevistas, como desviar de um objeto ou não cometer um acidente.

**Figura 7 - Exemplo de robô pessoal, robô de brinquedo BB8, da Disney**



Fonte: Araujo (2015)

Robôs de campo trabalham em ambientes não estruturados, pouco conhecidos ou perigosos. São os robôs exploradores (espacial, de vulcões, oceânicos), de mineração, antibombas, etc. Também podem se misturar com robôs de serviço, como o caso de máquinas agrícolas autônomas. Um exemplo destes robôs pode ser visto na Figura 8, e seria o Curiosity (já descrito anteriormente).

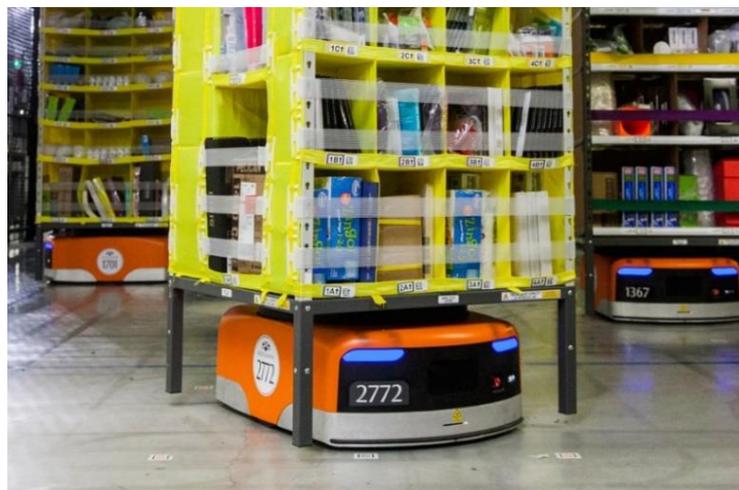
**Figura 8 - Exemplo de robô de campo, robô Curiosity, responsável pela exploração de Marte**



Fonte: Francisco (2014)

O último grupo são os Robôs Industriais. Esses robôs possuem a maior variedade, trabalhando em ambientes completamente estruturados e ajustados para a sua atividade. Nesse ambiente é fácil de controlar sua posição e a posição dos objetos com qual devem interagir, como o caso dos robôs que carregam estantes na Amazon, mostrado na Figura 9.

**Figura 9 - Exemplo de robô industrial, robô de logística da Amazon**



Fonte: Cabral (2014)

#### 4.1.2.2 Controle

Quanto ao tipo de controle exercido, Pieri (2002) subdivide em três tipos, que podem ser visto na Tabela 4:

**Tabela 4 - Classificação de robôs de acordo com sua forma de controle**

Forma de Controle	Descrição	Imagem
Teleoperado	Usuário indica movimento através de comando externo.	Figura 10
Semi-autônomo	Robô é capaz de executar uma determinada tarefa automaticamente, uma vez que seja solicitado pelo usuário a realização da mesma.	Figura 11 - Robô seguidor de linha
Autônomo	O robô executa suas atividades sem interferência humana.	Figura 12

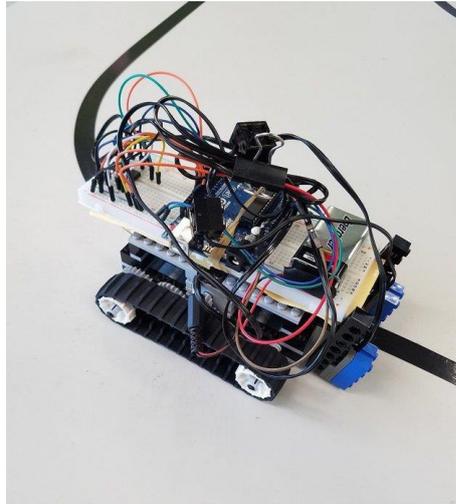
Fonte: Pieri (2002)

**Figura 10 - Drone militar teleoperado**



Fonte: Perez

**Figura 11 - Robô seguidor de linha com Arduino**



Fonte: Lordget (2017)

**Figura 12 - Robôs autônomos jogando futebol**



Fonte: Brown (2009)

#### 4.1.2.3 Anatomia

Quanto a sua anatomia, os robôs são divididos de acordo com a forma de se locomover, podendo ser em ambiente aquático, aéreo ou terrestre.

Robôs aquáticos não costumam possuir forma humanoide, sendo utilizados comumente para exploração submarina, como o fundo do oceano, ou sobre regiões alagadiças, como exemplo, pode-se citar o robô Chico-Mendes (Figura 13), desenvolvido pela Petrobrás para explorar o Rio Amazonas.

**Figura 13 - Robô Chico Mendes**



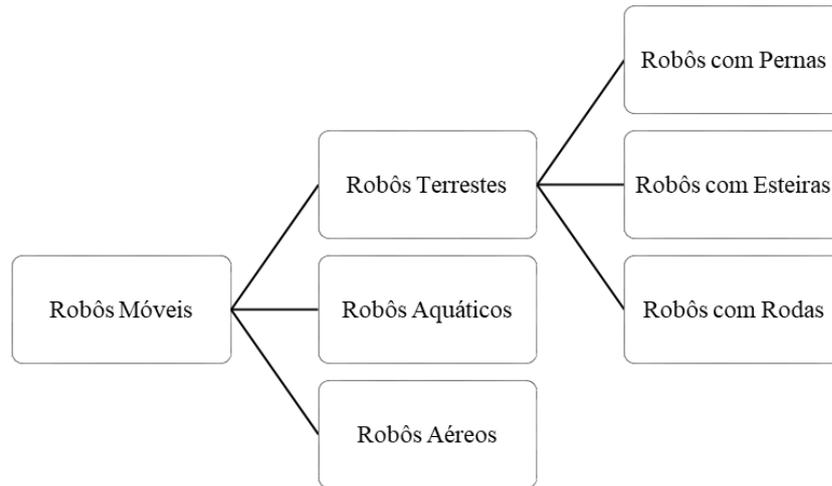
Fonte: Oliveira (2007)

Os robôs aéreos mais conhecidos são os aeromodelos e drones, desde miniaturas em brinquedo até gigantes com fins militares. São comumente equipados com câmeras e utilizados para inspeção e exploração.

O último grupo, o foco desse trabalho, são os ditos terrestres e possuem a maior variedade de aplicações entre os três grupos. Eles ainda são subdivididos em três classes, que serão aprofundados na próxima sessão. Os tipos são:

- Robôs com pernas: robôs com grande inspiração biológica, são utilizados para atravessar ambientes externos, superando escadas, terrenos acidentados e subidas.
- Robôs com esteiras: geralmente utilizados para superar ambientes irregulares, com areia, pedregulhos e solos fofos. São menos utilizados por conta do alto consumo energético.
- Robôs com rodas: grupo mais utilizado, são os de mais simples projeto, são utilizados em terrenos regulares.

**Figura 14 - Classificação dos robôs de acordo com sua anatomia**



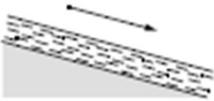
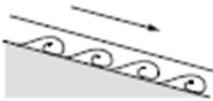
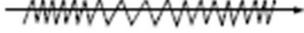
Fonte: Elaboração Própria

## 4.2 LOCOMOÇÃO

Um robô móvel necessita de mecanismos de locomoção que sejam compatíveis com a tarefa que deseja ser executada. Considerando a larga variedade de movimentos que podem ser executados, a seleção da forma de locomoção de um robô apresenta-se como um aspecto importante que define todo o projeto e design. Na academia, são projetados robôs capazes de andar, pular, correr, deslizar, patinar, nadar, voar e rolar, sendo em sua grande maioria movimentos inspirados na natureza animal (SIEGWART, 2004).

Entre os diversos movimentos inspirados na natureza (correr, deslizar, pular, nadar), existe um criado pelo homem: locomoção através de rodas, dotadas de maior eficiência em ambientes controlados. Sistemas inspirados na biologia tem como vantagem a larga variedade de movimentos, mas possuem a desvantagem de necessitar maior controle. Enquanto a roda é um mecanismo simples com suas variáveis sendo o raio, a velocidade de giro, configuração das rodas e o sentido da rotação, movimentos biológicos evoluíram através de dezenas de músculos e milhões de células que interagem perfeitamente entre si de forma a manter a fluidez e o movimento. Por último, o sistema de armazenamento de energia biológico, somando com as ativações musculares garantem toque, tempo de reação e eficiência muito superior às aproximações robóticas feitas pelo homem. Na Figura 15 pode-se ver o resumo dos tipos de movimento associado a sistemas biológicos (SIEGWART, 2004).

**Figura 15 - Mecanismos de locomoção em sistemas biológicos**

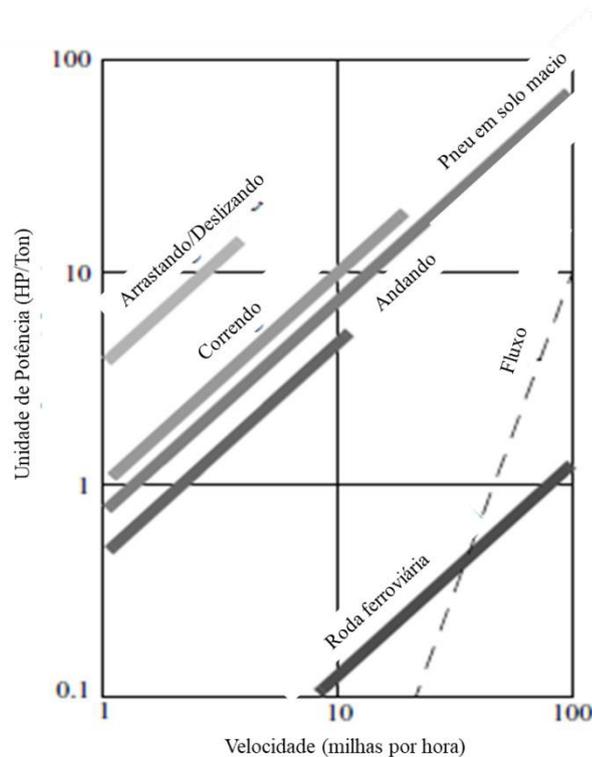
Tipo de Movimento	Força de Resistência	Movimento Cinemático Básico
Fluxo em um Canal 	Forças Hidrodinâmicas	Redemoinhos 
Rastejar 	Forças de Fricção	Vibração Longitudinal 
Deslizar 	Forças de Fricção	Vibração Transversal 
Correr 	Perda de enérgica cinética	Movimento oscilatório de um pendulo com múltiplas barras 
Pular 	Perda de enérgica cinética	Movimento oscilatório de um pendulo com múltiplas barras 
Andar 	Forças gravitacionais	Rolamento de um polígono 

Fonte: Adaptada de Siegwart (2004)

De modo geral, robôs articulados com pernas possuem mais graus de liberdade, que acrescentam maior complexidade mecânica em relação as rodas. As rodas, além de serem simples, possuem alto desempenho no plano. No entanto, se o solo, mesmo que plano, não for rígido (como caso de superfícies com areia), as rodas acumulam ineficiência por conta do atrito com o solo. Um quadro comparativo pode ser visto na Figura 16. Pelos gráficos, podemos afirmar que para uma mesma velocidade de locomoção, a potência instalada no sistema é maior para um robô que utiliza patas e corre do que um robô que opta por rodas para seu movimento.

Para projetar um robô móvel, devemos considerar diversas questões importantes, que podem se agrupar em três principais grupos: estabilidade, contato e ambiente.

**Figura 16 - Potência imposta pela velocidade em diversos sistemas de locomoção**



Fonte: Adaptado de Siegwart (2004)

- Estabilidade
  - Número e geometria do ponto de contato
  - Centro de Gravidade
  - Estabilidade mecânica e estática
  - Inclinação do terreno
- Contato
  - Tamanho e forma do contato com solo
  - Ângulo de contato
  - Atrito
- Ambiente
  - Estrutura
  - Meio ambiente

#### 4.2.1 Robôs com pernas

A locomoção de robôs com pernas é caracterizada por uma série de pontos de contato entre o robô e o solo. As principais vantagens incluem sua adaptabilidade e manobrabilidade em terrenos rugosos. Por conta de necessitar apenas de um número fixo de pontos de contato, a qualidade do solo entre os pontos não é relevante, permitindo que esses tipos de robôs ultrapassem buracos, fendas e degraus. Com controle adequado, é possível variar a altura do obstáculo a ser superado, introduzir um efeito de amortecimento e tornar independente o

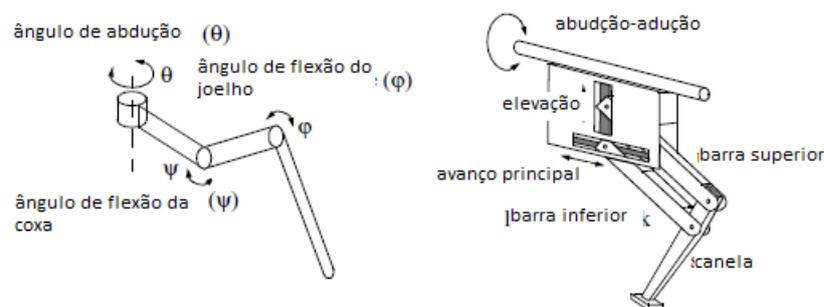
movimento de cada perna, superando irregularidades do terreno (SIEGWART, 2004; SILVA, 2005).

As desvantagens desse tipo de robô incluem a potência necessária e a complexidade mecânica. Cada perna possui certo grau de liberdade, devendo ainda ser capaz de sustentar parte do peso total do robô, sendo necessário ainda sustentar a elevação e a descida do mesmo. Além disso, a manobrabilidade excelente só é atingida com um número suficiente de pernas independentes com se movendo em direções diferentes (SIEGWART, 2004).

O número de pernas que um robô pode possuir depende muito da sua inspiração biológica. Inspirados em mamíferos podem possuir duas ou quatro pernas, inspirados em répteis costumam possuir quatro pernas e inspirados em insetos possuem seis ou mais pernas. Se usarmos o ser humano como inspiração, é possível a execução de movimento até mesmo como uma única perna. Algumas configurações de pernas com três graus de liberdade podem ser vistos na literatura.

Em geral, no mínimo dois graus de liberdade são necessários para realizar o movimento de elevação e de avanço, mas também é possível construir sistemas robóticos baseados em mecanismos com apenas um grau de liberdade. O mais comum é acrescentar um terceiro grau de liberdade, para garantir a manobrabilidade, como pode ser visto na imagem Figura 17 (SIEGWART, 2004).

**Figura 17 - Exemplos de pernas com três graus de liberdade**



Fonte: Adaptado de Siegart (2004)

Adicionando graus de liberdade, aumenta-se a manobrabilidade e também facilita a superação de obstáculos. No entanto, aumenta também o número de conexões e de atuadores, aumentando a necessidade de controle, a massa e a necessidade energética, tornando menos viável a fabricação do mesmo (SILVA, 2005).

No caso de robôs com múltiplas pernas, a coordenação entre as pernas é um fator importante na locomoção e no controle. O número de possíveis modos de andar depende do número de pernas. Modo de andar, para o determinado trabalho, definiremos como a sequência de elevação e avanço de pernas individuais. Para um robô com o número  $k$  de pernas, o número total de modos de andar será  $N$  definido como a expressão a seguir, considerando que todas as pernas possuem acionamento independente (TOOD, 1985).

$$N = (2k - 1)! \quad (4.1)$$

#### 4.2.1.1 Robô com uma perna

Robôs, com apenas uma perna, realizam o seu movimento através de saltos, similar ao movimento feito por um ser humano ou por cangurus (os últimos, mesmo com duas pernas, executam o movimento síncrono na realização de saltos). Estas máquinas adquirem equilíbrio e estabilidade dinâmica, sem haver preocupação relativa à coordenação de pernas (SILVA, 2005).

Em um primeiro momento, não parece haver aplicações práticas para estes tipos de equipamentos. No entanto, eles são aplicáveis para saltar obstáculos e pousar continuamente sem preocupação com estabilidade estática. Potencial aplicação é na exploração espacial, como na superfície de satélites, asteroides e cometas, onde a gravidade reduzida não facilita o uso nem de rodas nem de múltiplas pernas.

#### 4.2.1.2 Robô com duas pernas

De longe o tipo de robô móvel com perna mais complexo, necessitam de um controle robusto para garantir seu equilíbrio tanto dinâmico quanto estático. Mesmo assim, a tecnologia continua avançando, principalmente nos robôs do tipo humanóides.

Suas aplicações vão de brinquedos a robôs de serviço, que executam atividades rotineiras da casa ao mesmo tempo que possuem uma aparência menos invasiva.

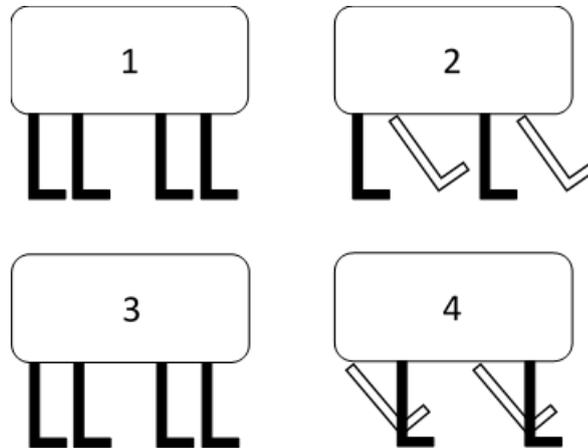
#### 4.2.1.3 Robô com quatro ou mais pernas

A maioria dos robôs móveis enquadram-se nessa categoria. São esses robôs que apresentam melhor equilíbrio estático e dinâmico, tendo inspiração em mamíferos, répteis e insetos.

Os robôs com muitas pernas são utilizados na exploração de ambientes remotos (como vulcões e o espaço), em operações de resgate (como buscando vítimas de deslizamento de terra) e para ambientes hostis ou perigosos (área de mineração ou com elevados níveis de radiação).

Seu movimento é sincronizado entre pares, de modo a garantir a continuidade do robô, como visível na Figura 18.

**Figura 18 - Caminhar de robô com quatro patas, com sincronismo par a par**

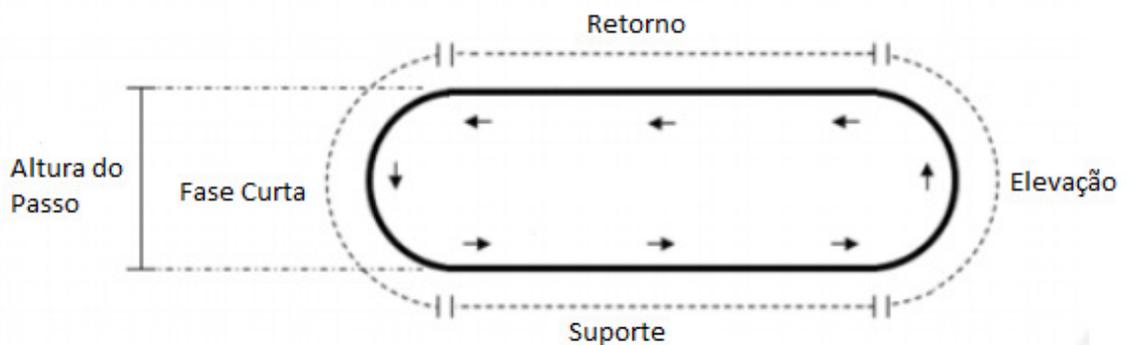


Fonte: Elaboração Própria

#### 4.2.1.4 Robôs com um grau de liberdade

Na contramão dos robôs que apresentam cada vez mais controle, existe uma classe de robôs que possuem movimento com suas pernas apresentando apenas um grau de liberdade (avanço e elevação fixos). Esses robôs possuem seu movimento baseado em mecanismos de barras, que através de conexões realizam movimento, configurando um ciclo como descrito na Figura 19.

**Figura 19 - Ciclo de Movimento de um passo em um robô de mecanismo com um grau de liberdade**



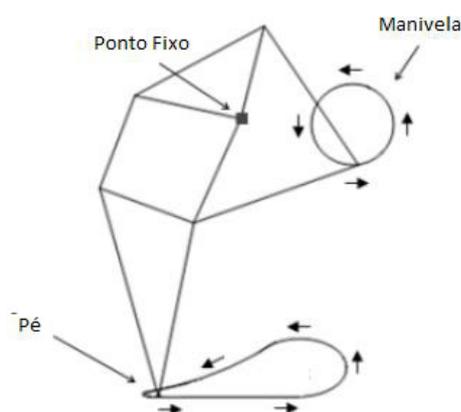
Fonte: Elaboração Própria

Exemplo de mecanismo que é capaz de fornecer movimento através de barras é o popular mecanismo de Theo Jansen, que será aprofundado mais à frente.

### 4.3 MECANISMO DE THEO JANSEN

O mecanismo de Theo Jansen (Figura 20) é uma configuração muito popular no desenvolvimento de cadeias cinemáticas, muito devido ao fato de ser operado por um único atuador e ser capaz de ultrapassar obstáculos simultaneamente ao avanço horizontal do robô. Seu desenvolvedor, antigo estudante de física da Universidade de Tecnologia de Delft, iniciou em 1990 o projeto artístico apelidado de strandbeest (do holandês, criaturas da praia), que era idealizado como máquinas que pudessem se locomover de forma autônoma, assim como evoluir por si só. O seu movimento é inspirado em uma ponte entre arte e engenharia, entre máquina e elementos da natureza (STRANDBEEST, 2018).

Figura 20 – Mecanismo de Theo Jansen



Fonte: Elaboração Própria

Possuir apenas um grau de liberdade é um diferencial quando se pensa em economia (de fabricação e controle), mas também acompanha diversas limitações. A principal limitação do modelo proposto por Theo é a dificuldade de seu mecanismo escalar obstáculos, uma vez que possui movimento em formato padronizado, não sendo possível ultrapassar obstáculos superiores ao avanço vertical pré-definido assim como não consegue superar obstáculos mais longos que o avanço horizontal de suas pernas (KOMADA e WAGATSUMA).

Dessa forma, diversas otimizações no modelo foram propostas, estas serão melhor explicadas na próxima seção.

#### 4.3.1 Estado da arte em otimizações de Theo Jansen

O mecanismo de Theo Jansen pode ser considerado otimizado considerando os princípios estipulados pelo seu autor. Para encontrar as dimensões que compõem o sistema, o

autor determinou que o movimento tido como ideal, considerando a natureza, seria do ponto de contato com o solo (chamado de pé) realizar movimento em forma de triângulo com uma base paralela ao solo e extremidades arredondadas. Dessa forma, quando o pé entrasse em contato com o solo, a perna seria suspensa e rapidamente executaria o movimento de avanço (STRANDBEEST, 2018).

A curva realizada depende do tamanho das barras utilizadas, assim como a posição de fixação da manivela. Para encontrar as dimensões que realizariam o movimento proposto, Theo optou por utilizar um método evolucionário de otimização (que será descrito mais a frente no presente trabalho) que, devido às limitações computacionais da época, requereu meses para apresentar os números chamados pelo mesmo como números mágicos (ou sagrados, na tradução direta) (STRANDBEEST, 2018).

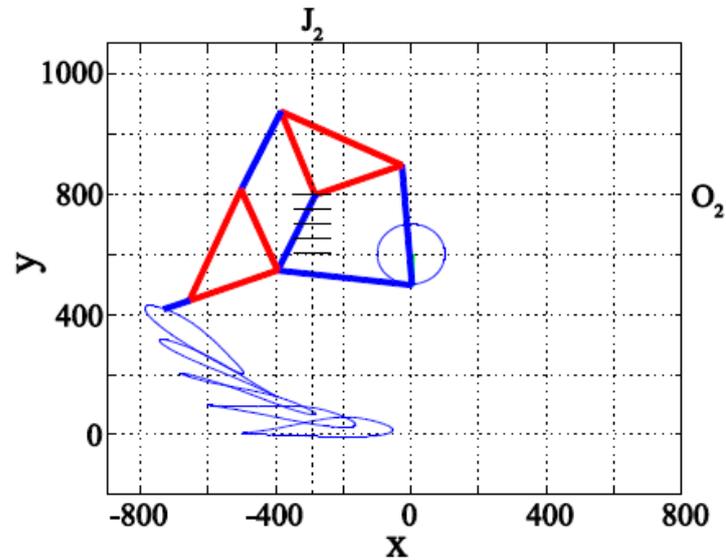
Visto que o foco do autor era a independência do movimento e sua conceituação artística, diversos outros cientistas, engenheiros e designers buscaram melhorar seu projeto, garantindo maior eficiência, maior estabilidade ou maior diversidade de movimento. As principais contribuições da literatura foram reunidas na Tabela 5 a seguir:

**Tabela 5 - Estado da arte de otimizações no mecanismo de Theo Jansen**

<b>Autor</b>	<b>Modificação Proposta</b>	<b>Imagem</b>
Patnaik	Fez a análise comparativa entre a utilização do mecanismo como forma de locomoção ao invés de rodas, aplicado ao uso em caminhões de carga. Seu trabalho determinou como estimar a capacidade de carga do sistema.	-
Ghassei	Utilizou o software Mathematica para simular e analisar o design comparativo entre mecanismos baseados em Theo Jansen. Também analisou a trajetória executada pelo pé do sistema e o centro de massa das barras individualmente e do sistema ao executar movimento.	-
Komada e Wagatsuma	Permitindo que o ponto fixo da barra ternária superior seja móvel, é possível variar o ângulo de ataque do movimento e permitir que obstáculos de diferentes alturas sejam superados. Ressalta-se que com a mudança de posição também é percebida a diminuição da região de contato entre a perna e o solo.	Figura 21
Nansai et al.	Através de atuadores pneumáticos, variar a dimensão das barras que compõem o movimento, dessa forma alterando a trajetória do movimento.	Figura 22

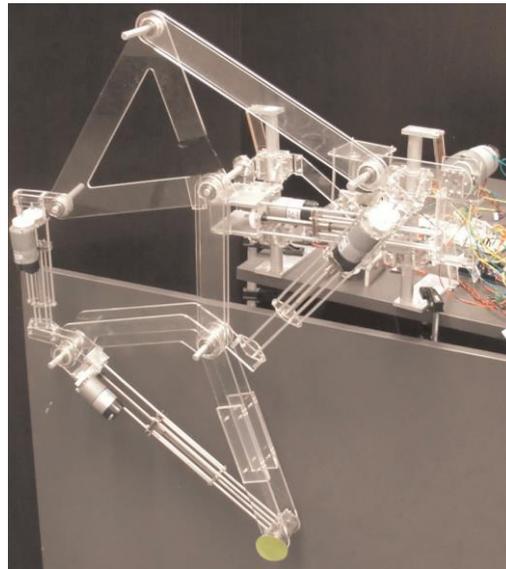
Fonte: Compilado pelo Autor

Figura 21 - Modelo proposto por Komada e Wagatsuma, com o ponto fixo de suporte da barra ternária móvel



Fonte: Komada e Wagatsuma

Figura 22 - Protótipo de mecanismo com barras de dimensões variáveis



Fonte: Nansai et al. (2015)

Considerando os avanços já feitos pela literatura, acredita-se que o caminho a ser melhor explorado, com contribuição ao modelo e permitindo abertura de novas possibilidades de avanço, seja melhorar as técnicas de otimização, assim como a definição de novos objetivos a serem modelados. A melhoria de técnicas deve-se muito aos avanços sofridos pela ciência da computação, que transformaram cálculos que duravam meses a serem concluídos em soluções

de poucos minutos. Já a definição de novos objetivos para a otimização abre portas para novas aplicações do modelo, indo de acordo com as justificativas e objetivos do presente trabalho.

#### 4.4 ALGORITMOS DE OTIMIZAÇÃO

Quando se tem em mente otimização, diversas literaturas remontam seu início ao livro Eneida (século I a.C), de Virgílio. Nele, Dido, uma fenícia, convenceu um chefe africano a doar-lhe o máximo de terras que ela pudesse cercar com a tripa de um touro. A mesma cortou tripas em centenas de tiras finas e as uniu em formato de um semicírculo no chão, dando origem assim à cidade de Cartago. Mesmo de forma lúdica, o texto de Virgílio já apresenta o conhecimento da antiguidade em relação à figura geométrica com a maior área quando fixado o perímetro.

Na história da matemática, a otimização de resultados e funções esteve presa aos conceitos de máximo e mínimo até o século XVII. Era associada a cálculos de tangentes e áreas através das noções de derivada e integral de Newton e Leibniz. Apenas com a conceituação de Euler de função matemática e a contribuição de Lagrange em construir uma matemática analítica desvincilhada de figuras geométricas que foi possível dar o próximo passo em direção ao cálculo de ideais.

De forma a tornar visível a evolução da matemática no sentido da evolução, pode-se resumir sua história na Tabela 6, que apresenta os principais autores e sua contribuição com o tema.

**Tabela 6 - Análise histórica de contribuições a otimização de problemas matemáticos**

Século	Autor	Contribuição
IV a.C.	Euclides	Considerado um dos principais matemáticos da história, demonstrou em sua obra diversas otimizações relacionando geometria plana, como otimização de áreas, distância ou ângulos. Sua metodologia era o método de redução ao absurdo.
IV	Pappus	Considerado o último dos grandes geómetras gregos, seus teoremas são a base da moderna geometria projetiva. Avançou na obra de Euclides quando não se limitou a geometria plana, como também espacial.
XVII	Fermat	Autor do método de construção de tangentes a curvas, que permitiu o cálculo de máximos e mínimos.
XVII	Newton e Leibniz	Criadores do Cálculo Diferencial, ferramenta que serviu de base para avanços da matemática e da computação.
XVII	L'Hôpital	A obra de L'Hôpital foi a primeira que utilizou a base de Cálculo Diferencial para calcular o máximo ou o mínimo de uma função qualquer. Seus conceitos resolveram problemas além da geometria, como problemas aritméticos, da física e da astronomia.

XVII	Euler	Euler é o responsável pelo conceito de Função Matemática e, trabalhando com Equações Diferenciais Ordinárias, desenvolveu equações para aproximar o valor de funções complexas por retas. Suas equações serviram para a otimização aerodinâmica, fundamental no desenvolvimento aeronáutico e aeroespacial.
XVII	Lagrange	Desenvolveu os chamados Multiplicadores de Lagrange, que permitem encontrar extremos (máximos e mínimos) de uma função com uma ou mais variáveis. Seu método é utilizado em diversos problemas de programação.
XVIII	Gauss	A principal contribuição de Gauss foi seu trabalho com regressões não lineares, utilizados para desenvolver o Algoritmo de Gauss-Newton para resolver problemas de mínimos quadrados não lineares.
XIX	Cauchy	Criador da noção de continuidade de uma função, trabalhou com convergências de séries inteiras, sendo autor do método de otimização conhecido como Gradiente Descent.
XX	Turing	Criador do primeiro computador, Turing também foi responsável pelo início do que hoje conhecemos como Aprendizado de Máquina (ou Machine Learning), quando criou uma máquina para resolver códigos nazistas durante a Segunda Guerra Mundial.
XX	Dantzig	Considerado pai da programação linear, apresentou em 1949 o Método Simplex, utilizado para resolver problemas de otimização linear (equações ou inequações).
XX	Kantorovich	Matemático e economista russo, desenvolveu um modelo de programação linear para cálculos de aplicação de recursos econômicos. Seus modelos foram base para Dantzig desenvolver o seu Método Simplex.
XX	Neumann	Considerado um dos principais matemáticos do último século, seu trabalho com programação linear e modelos de convergência contribuiu na teoria dos conjuntos, análise funcional, teoria ergódica, mecânica quântica, ciência da computação, economia, teoria dos jogos, análise numérica, hidrodinâmica, estática e muitas outras áreas de aplicação.

Fonte: Elaboração Própria

Antes de avançar entre os métodos de otimização mais utilizados, é preciso conceituar alguns termos que são comuns em todos eles:

- Variáveis de Projeto: são as variáveis que sofrem alterações na busca pela solução ideal, podendo ser contínuas, inteiras ou discretas.
- Restrições: são igualdades ou desigualdades que limitam as potenciais soluções.
- Espaço de Busca: é o conjunto, espaço ou região que contém as possíveis soluções da otimização, sendo delimitado pelas restrições.
- Função Objetivo: é função com uma ou mais variáveis que se busca otimizar.
- Ponto Ótimo: é o ponto formado pelas variáveis que maximiza ou minimiza a função objetivo e satisfaz todas as restrições.

- Valor Ótimo: é o valor da função objetivo no Ponto Ótimo.

O primeiro método de otimização utilizado é o método baseado em algoritmos determinísticos, que geram uma sequência de possíveis soluções a partir de, na maioria dos casos, o uso de pelo menos a primeira derivada da função objetivo em relação a cada uma das variáveis do projeto. Nos métodos determinísticos, as restrições e a função objetivo são funções matemáticas, sendo estas contínuas e diferenciáveis no espaço de busca (HOLTZ, 2005).

Os métodos determinísticos possuem teoremas que garantem a convergência para uma solução ótima, mas que não é necessariamente a solução ótima global da função objetivo. Isso ocorre por conta da dependência da solução do ponto de partida fornecido, que permite a convergência para soluções locais (HOLTZ, 2005).

Através da computação, esses métodos podem ser solucionados de duas formas:

- Programação Linear: possível quando a função objetivo e suas restrições são funções lineares das variáveis do projeto. Nesse caso, o método mais comum de solução é o Simplex, desenvolvido por Dantzig.
- Programação Não-Linear: ocorre quando ou a função objetivo ou pelo menos uma das restrições é função linear das variáveis de projeto. Nessa situação, existem diversas formas de solução, como Método de Programação Quadrática Sequencial e o Método do Gradiente Reduzido.

O segundo método de otimização são os baseados em algoritmos probabilísticos. Esses métodos se utilizam somente da função objetivo e iniciam dados de otimização e parâmetros estocásticos para encontrar a solução. Esses métodos possuem diversas vantagens, como (BASTOS, 2004):

- Função objetivo e restrições não precisam de representação matemática entre si;
- Não é necessário que a função objetivo seja contínua ou diferenciável;
- Funcionam com qualquer tipo de parâmetro de solução, seja contínuo ou discreto;
- Não necessitam de formulações complexas;
- Não há restrição quanto ao ponto de partida dentro do espaço de busca, sempre localizando o ponto ótimo global;

- Realizam buscas simultâneas no espaço de potenciais soluções, sendo mais rápido para encontrar o ponto ótimo;
- A depender dos custos computacionais da função objetivo, podem otimizar muitas variáveis simultaneamente.

No entanto, mesmo que mais preciso, os métodos probabilísticos solicitam maior tempo de processamento em relação aos métodos determinísticos.

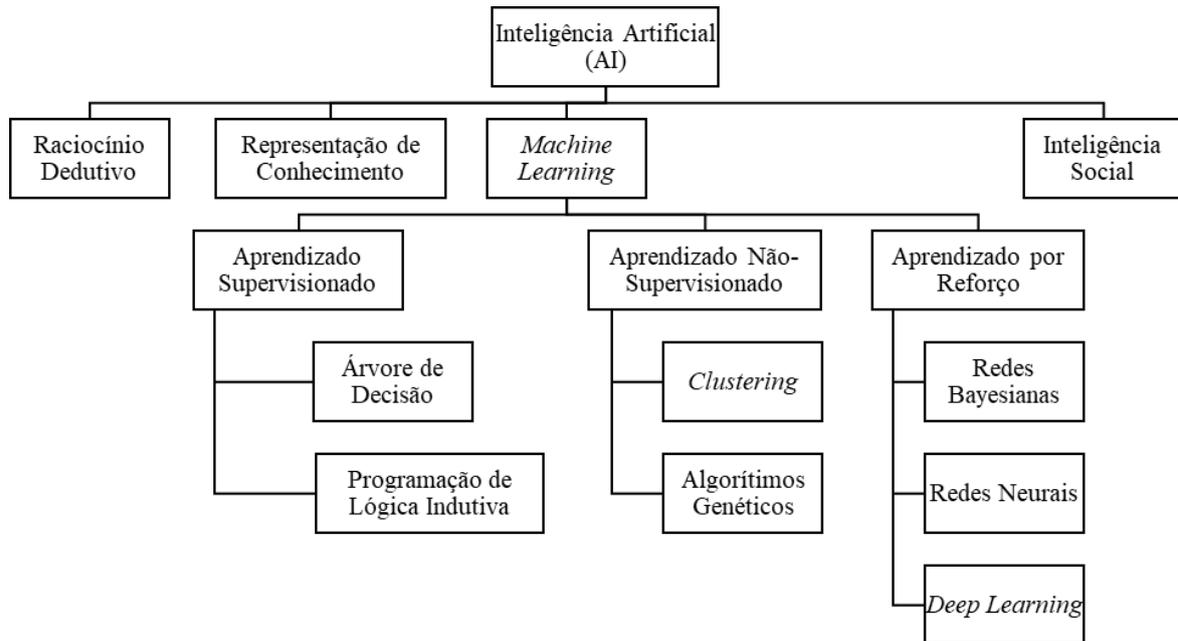
#### **4.4.1 Aprendizado de Máquina**

Muito conectado à otimização matemática, o conceito de Aprendizado de Máquina (Machine Learning) surgiu produzindo métodos, teorias e algoritmos. Nascido como uma subárea da Inteligência Artificial, consiste no ramo da computação que permite computadores aprenderem sem serem programados para tal atividade. O aprendizado se baseia em construir algoritmos que aprendam com seus erros e fazer previsões de dados, focando no raciocínio indutivo (extração de regras e padrões de um conjunto de dados) (MONARD & BARANAUSKAS, 2003).

O Aprendizado de Máquina pode ser subdividido em três grandes categorias, dependendo da forma de sinal e retorno do aprendizado do sistema. Essa divisão pode ser visualizada na Figura 23. As categorias são (MONARD & BARANAUSKAS, 2003):

- **Aprendizado Supervisionado:** as entradas e saídas desejadas são apresentadas ao computador. O objetivo desse método é que o sistema aprenda uma regra geral que relacione as entradas e saídas.
- **Aprendizado Não-Supervisionado:** nenhum tipo de estrutura precisa ser fornecido ao sistema, deixando o sistema encontrar por si só a estrutura baseada nas entradas fornecidas.
- **Aprendizado por Reforço:** o algoritmo interage com um ambiente dinâmico, recebendo premiações ou punições à medida que executa atividades.

**Figura 23 - Principais ramos da Inteligência Artificial**



Fonte: Compilado pelo Autor

De modo a aprofundar os principais métodos de aprendizado de máquina, foi criada a Tabela 7 a seguir:

**Tabela 7 - Técnicas de Aprendizado de Máquina**

<b>Forma de Aprendizado</b>	<b>Técnica</b>	<b>Descrição</b>
Supervisionado	Árvore de Decisão	Técnica baseada em árvore de decisões como um modelo de previsão, mapeando as observações sobre a influência de determinado parâmetro em relação as saídas. São muito populares para resolver problemas de classificação, regressão e análise exploratória (CAMPOS, 2017).
Supervisionado	Programa de Lógica Indutiva	Técnica que faz uso de programação lógica para criar ferramentas e hipóteses a partir de exemplos e conhecimento prévios. (Hipótese = Exemplos Positivos + Exemplos Negativos + Conhecimento Prévio). A construção de teorias é baseada e expressa por cláusulas de Horn (PITANGUI, 2013).
Não-Supervisionado	Clustering	A técnica de clustering consiste em atribuir observações a subconjuntos de forma que observações similares são agrupadas no mesmo cluster de acordo com critérios pré-designados. Seu processo consiste em 6 etapas de aprendizado: 1. Seleção de atributos; 2. Medida de proximidade; 3. Critério de agrupamento; 4. Algoritmo de agrupamento; 5. Verificação dos resultados; e 6. Interpretação dos resultados (FARIA, 2015).

Não-Supervisionado	Algoritmos Genéticos	Algoritmos Genéticos são técnicas baseadas no processo de seleção natural darwiniano, assim como conceitos de crossover (cruzamento) e mutação genética. Seus detalhes serão explorados na próxima seção.
Por Reforço	Redes Bayesianas	Consiste em um modelo gráfico probabilístico para raciocínio baseado em incerteza, onde seus nós representam variáveis e os arcos representam a conexão entre eles. Sua metodologia é baseada no Teorema de Bayes, que relaciona a probabilidade condicionada a sua inversa (AZEVEDO, 2013).
Por Reforço	Redes Neurais	É um algoritmo inspirado nas redes neurais biológicas, com estrutura simulando neurônios artificiais. Seu modelo é composto pelo combinado de diversos neurônios que se constituem por três elementos básicos: um conjunto de entradas, um somador que acumula os sinais de entrada e uma função de ativação que limita o intervalo de amplitude do sinal de saída. A aprendizagem acontece quando a rede se permite ajustar os pesos de cada entrada na composição do somador e no ajuste do intervalo de amplitude do sinal de saída (FERNEDA, 2006).
Por Reforço	Deep Learning	Forma mais complexa de machine learning por reforço, consiste em diversas camadas de redes neurais com o objetivo de simular decisões humanas. A técnica utiliza uma cascata com diversas camadas de processamento não-linear para extração de informações e transformação de características, sendo a saída de uma camada a entrada da camada posterior. Todas as camadas de redes neurais são passíveis de aprendizado, possuindo diferentes níveis de abstração e de hierarquia de conceitos (DENG & YU, 2014).

Fonte: Compilado pelo Autor

#### 4.4.2 Algoritmos Evolutivos

Por apresentar maior liberdade no sentido de condições de contorno, se optou por utilizar algoritmos evolutivos como ferramenta de otimização. Com tal escolha, é necessário aprofundar o método e seu embasamento, de maneira a permitir a correta escolha de parâmetros e avaliação dos resultados.

Os algoritmos evolutivos são apoiados em processos evolutivos naturais e possuem fundamentos como tais (DE JONG, 2006):

- Os recursos são escassos, devendo uma ou mais populações concorrerem por eles;
- O indivíduo mais adaptado sobrevive e reproduz-se;
- As mudanças na população são dinâmicas, devido a nascimento e morte de indivíduos; e
- Características são herdadas entre gerações, porém os indivíduos mais novos não são idênticos aos pais.

Além dos fundamentos serem semelhantes à evolução das espécies, existem três principais fatores evolutivos que são semelhantes entre algoritmos evolutivos: seleção natural, recombinação genética e mutação (DE JONG, 2006).

Seleção Natural ocorre devido à escassez de recursos e a competição por eles. Apenas os mais bem adaptados sobrevivem e produzem descendentes. Dessa forma, apenas os melhores serão fundamentais na formação das novas gerações.

Recombinação Genética ou cruzamento (crossover no inglês) ocorre devido à reprodução sexuada, onde os mais aptos misturam seus genes para a formação da próxima geração. Dessa forma, a população mais jovem será composta pelas melhores características da população anterior.

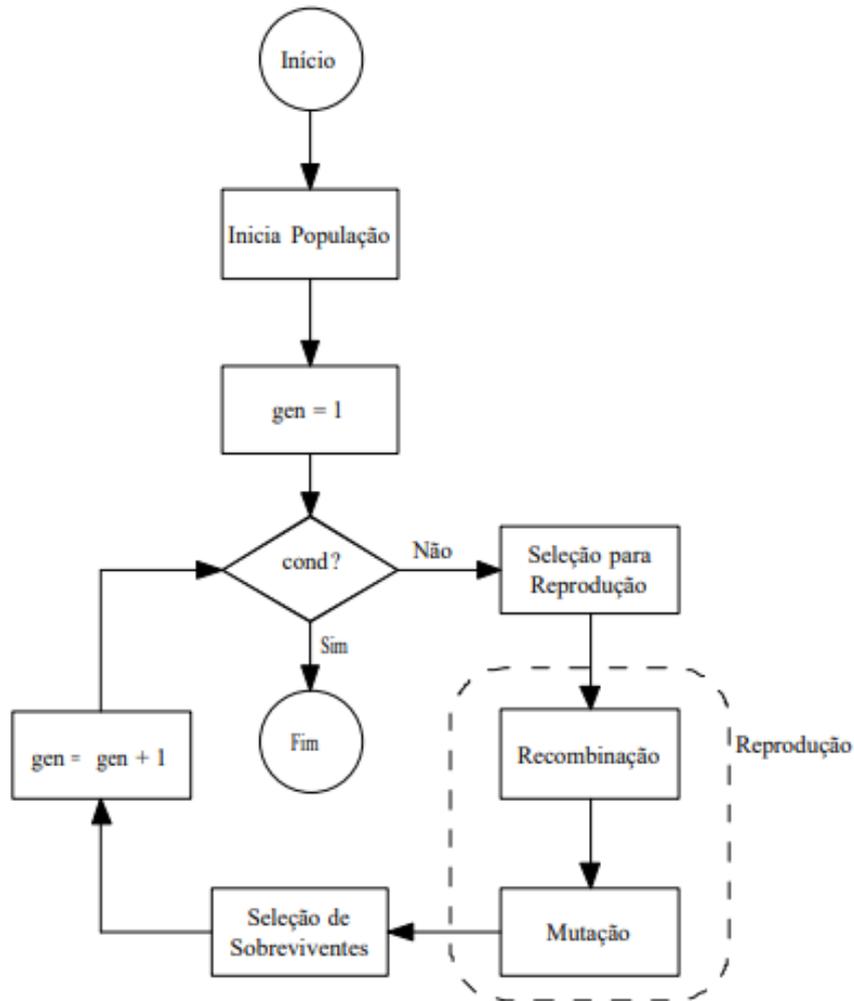
A última forma de evolução é a mutação, onde por diversos fatores (internos ou externos) características de um indivíduo da população são alteradas sem vínculo direto com a hereditariedade que o formou. Dessa forma, as mudanças podem favorecer a adaptação do indivíduo ou até mesmo ser letal para o mesmo.

Dentre as aplicações de algoritmos evolutivos, existem os chamados Algoritmos Genéticos, propostos por John Holland em 1970 através do seu livro, *Adaptação de Sistemas Naturais e Artificiais*. Holland criou o conhecido como “Teorema dos Esquemas de Holland”, que provou que os algoritmos genéticos são superiores a busca aleatória por resultados.

Seu funcionamento básico consiste na evolução de potenciais soluções do problema a ser otimizado. O primeiro passo é definir o objetivo da otimização, assim como as restrições para o modelo. Com isso, o algoritmo gera uma população aleatória (composta por diversas potenciais soluções) para iniciar o cálculo. Esta população é então avaliada de acordo com a aptidão para com o objetivo, definindo assim os indivíduos mais aptos. Estes se recombinaem e sofrem mutação, formando assim uma nova população e reiniciando o processo. (Figura 24) (DE JONG, 2006).

Um fator importante na geração de algoritmo genético é a condição de parada de processamento. As opções mais comuns utilizadas são o tempo sem ganho efetivo, diversidade da população, o número de interações sem ganho efetivo e combinações entre os três fatores anteriores.

Figura 24 - Diagrama de fluxo de algoritmo genético



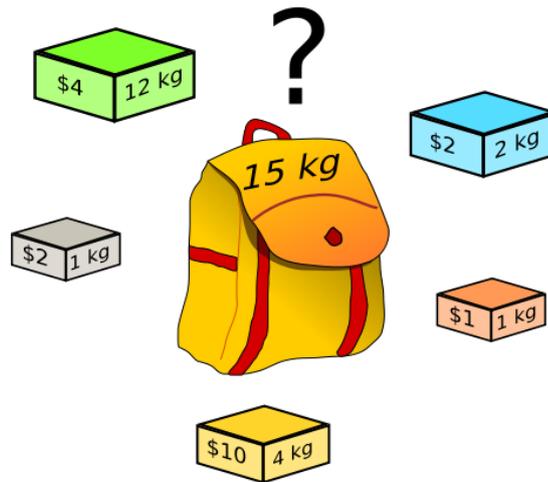
Fonte: De Jong (2006)

Para melhor compreensão do método, apresenta-se um exemplo prático utilizando um código genérico.

#### 4.4.2.1 Exemplo de otimização por Algoritmo Genético

Um bom exemplo para se demonstrar o uso de algoritmo genético é o famoso problema da mochila, ou o problema de Knapsack (Figura 25). Para esse problema, o usuário possui uma mochila com capacidade pré-definida e uma série de caixas com diferentes valores e pesos. O objetivo é fazer com que a mochila transporte o maior valor possível utilizando sua capacidade máxima.

Figura 25 - Problema da Mochila



Fonte: Wikipedia

Para iniciar, definiremos o preço de cada caixa como  $p_i$  e o seu peso como  $w_i$ . Além disso, a mochila possui uma condição de restrição devido ao seu peso, podendo assim chamar esse peso máximo de  $W$ . Para definir se uma caixa estará presente ou não dentro da mochila, representa-se a função de avaliação  $x_i = (x_1, \dots, x_n)$  como um vetor binário ( $x=1$  para presença da caixa e  $x=0$  para a caixa ser ignorada). Assim, nosso problema pode ser resumido como:

$$\text{maximizar } \{f(x)\} = \text{maximizar } \{\sum_{i=1}^n x_i p_i\} \quad (4.2)$$

$$\text{restrito a } \sum_{i=1}^n x_i w_i \leq W \quad (4.3)$$

$$x_i \in \{0,1\}, i = 1,2, \dots, n \quad (4.4)$$

Para o problema ilustrado, teremos a distribuição como vista na Tabela 8. Para facilitar a visualização, adicionamos a função  $r=p/w$  como forma de rapidamente entender o preço por cada kg inserido. De forma direta, observa-se que a solução consiste em selecionar itens 2, 3 e 4, por possuírem melhor aproveitamento de peso por cada unidade de preço.

Tabela 8 - Itens do problema da mochila

Item	1	2	3	4	5
$p_i$	4	2	2	10	1
$w_i$	12	2	1	4	1
$r_i = p_i/w_i$	0,33	1	2	2,5	1

Fonte: Elaboração Própria

Considerando lógica de programação genérica, teremos:

#Definição de Dados#

$p = (4; 2; 2; 10; 1)$  #Preços

$w = (12; 2; 1; 4; 1)$  #Pesos

$W = 15$  #Capacidade da mochila

$n = \text{comprimento}(p)$  #Número de Itens

#Definição da Função Objetivo#

$f = \text{soma}(x * p)$  #Soma dos Preços dos itens selecionados

$g = \text{soma}(w) * \text{abs}(\text{soma}(x * w) - W)$  #Restrição para não ultrapassar capacidade

$\text{objetivo} > \text{função}(x) = f - g$

#Otimização#

Algoritmo Genético:

$\text{ga}(\text{tipo} = \text{"binário"}; \text{#Condição para selecionar se o item entra ou não na mochila})$

$\text{fitness} = \text{objetivo}; \text{#Função que avaliará a otimização}$

$n\text{Bits} = n; \text{#Tamanho do vetor de cada solução}$

$\text{maxiter} = 100; \text{#Número máximo de gerações a serem geradas}$

$\text{tamanhopop} = 100; \text{#Tamanho da população}$

Executar

#Solução#

$x.\text{solucao}$  #Solução calculada será (1; 1; 1; 0; 0)

$\text{soma}(x.\text{solucao})$  #Número de elementos selecionados: 3

$\text{soma}(x.\text{solucao} * p)$  #Preço total dos itens selecionados: 8

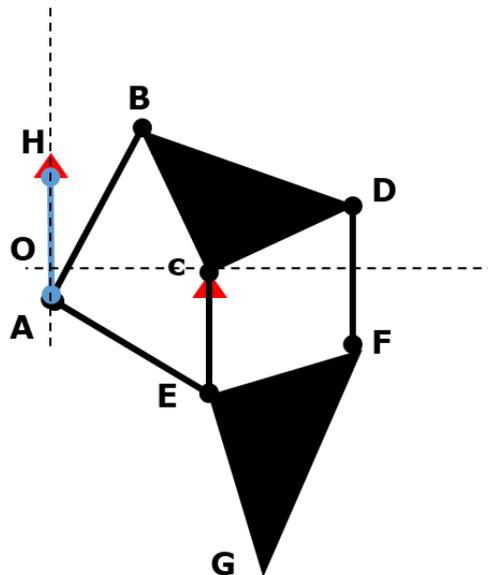
$\text{soma}(x.\text{solucao} * w)$  #Peso total transportado: 15

## 5 CÁLCULOS E OTIMIZAÇÃO

### 5.1 COORDENADAS DO SISTEMA

Antes de fazer as modificações necessárias para otimização do sistema proposto, devemos encontrar as funções que compõem o problema a ser otimizado. Para esse propósito, devemos dimensionar cada uma dessas barras, de modo a prever o movimento do ponto G e, portanto, o movimento final de nosso robô. A fim de cálculos para o presente trabalho, inseriremos a origem das coordenadas cartesianas na intersecção dos dois pontos fixos, como representado na Figura 26.

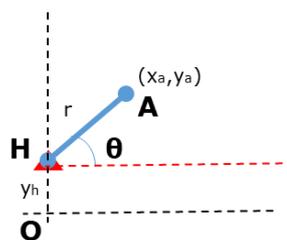
Figura 26 - Eixos de referência



Fonte: Elaboração Própria

Considerando a barra em azul a barra motora, ligado ao motor do robô, obtemos as primeiras equações de movimento, que se referem ao nó A (Figura 27):

Figura 27 - Manivela (r)

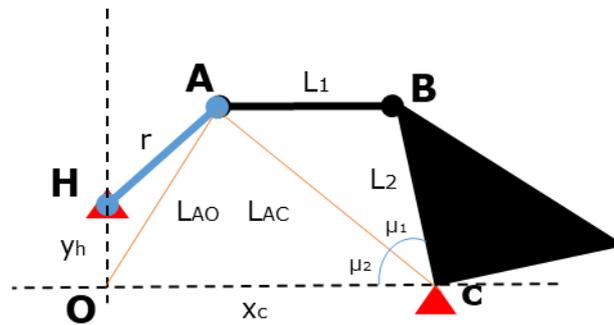


Fonte: Elaboração Própria

$$A: \begin{cases} x_a = r * \cos(\theta) \\ y_a = y_h + r * \text{sen}(\theta) \end{cases} \quad (5.1)$$

Continuando para o próximo nó, encontramos a seguinte configuração geométrica (Figura 28).

Figura 28 - Barra L1



Fonte: Elaboração Própria

Onde:

- $L_{AO}$ : distância do ponto A para a origem, dado por:

$$L_{AO} = \sqrt{r^2 * \cos^2(\theta) + (y_h + r * \text{sen}(\theta))^2} \quad (5.2)$$

- $L_{AC}$ : distância do ponto A ao ponto C, considerando a variável  $\theta$ . Traçamos uma reta perpendicular ao eixo x passando pelo ponto, encontrando assim a hipotenusa LAC, dada por:

$$L_{AC} = \sqrt{(r * \cos(\theta) - x_c)^2 + (y_h + r * \text{sen}(\theta))^2} \quad (5.3)$$

- $\mu_1$  e  $\mu_2$ : ângulos entre barra  $L_2$  e o eixo x.
- $x_c$ : distância entre a origem do sistema e o ponto C.

Para encontrarmos as coordenadas do ponto B, consideraremos o triângulo ACB.

Aplicando a lei dos cossenos obtemos:

$$L_1^2 = L_2^2 + L_{AC}^2 - 2 * L_2 * L_{AC} * \cos(\mu_1) \quad (5.4)$$

$$\mu_1 = \cos^{-1} \left( \frac{L_2^2 + L_{AC}^2 - L_1^2}{2 * L_{AC} * L_2} \right) \quad (5.5)$$

Já considerando o triângulo ACO, obtemos:

$$L_{AO}^2 = x_c^2 + L_{AC}^2 - 2 * x_c * L_{AC} * \cos(\mu_2) \quad (5.6)$$

$$\mu_2 = \cos^{-1} \left( \frac{x_c^2 + L_{AC}^2 - L_{AO}^2}{2 * L_{AC} * x_c} \right) \quad (5.7)$$

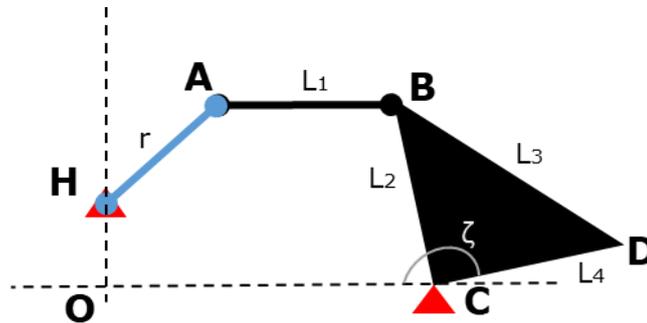
Assim, podemos afirmar que o ângulo relativo da barra  $L_2$  é dado pela soma,  $\mu = \mu_1 + \mu_2$  para toda situação em que  $y_a$  for superior que zero. Caso  $y_a$  seja zero,  $\mu = \mu_1$  e  $\mu_2 = 0$ . Já no último caso, em que  $y_a$  é menor que zero, deveremos na verdade subtrair e obter que  $\mu = \mu_1 - \mu_2$ .

Como o ponto C é fixo no espaço, podemos considerar o movimento do nó B como uma circunferência centrada no ponto. Dessa forma:

$$B: \begin{cases} x_b = x_c + L_2 * \cos(\mu) \\ y_b = y_c + L_2 * \text{sen}(\mu) \end{cases} \quad (5.8)$$

O próximo ponto para analisarmos é o nó D (Figura 29). Como a união entre as barras 2, 3 e 4 formam uma barra tripla, temos que o ângulo formado entre  $L_2$  e  $L_4$  é constante, ao qual chamaremos  $\zeta$ .

Figura 29 - Barras L2, L3 e L4



Fonte: Elaboração Própria

Portanto, centrando C como referência, obtemos que:

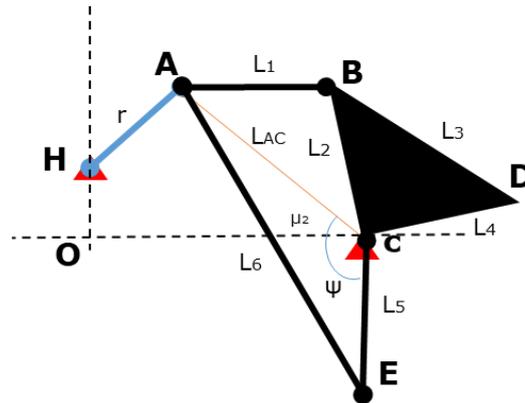
$$D: \begin{cases} x_d = x_c + L_4 * \cos(\zeta) \\ y_d = y_c + L_4 * \text{sen}(\zeta) \end{cases} \quad (5.9)$$

Onde:

$$\zeta = \mu + \cos^{-1} \left( \frac{L_2^2 + L_4^2 - L_3^2}{2 * L_2 * L_4} \right) \quad (5.10)$$

Passando agora para a parte inferior, focamos em encontrar as equações que definem o ponto E (Figura 30).

Figura 30 - Barras L5 e L6



Fonte: Elaboração Própria

Com essa configuração, aplicando a lei dos cossenos, obtemos diversas combinações que dependem da posição do ponto A. Caso  $y_a \geq 0$ , teremos:

$$L_6^2 = L_5^2 + L_{AC}^2 - 2 * L_5 * L_{AC} * \cos(\mu_2 + \psi) \quad (5.11)$$

$$\psi = \cos^{-1} \left( \frac{L_5^2 + L_{AC}^2 - L_6^2}{2 * L_{AC} * L_5} \right) - \mu_2 \quad (5.12)$$

Já caso  $y_a < 0$ , teremos:

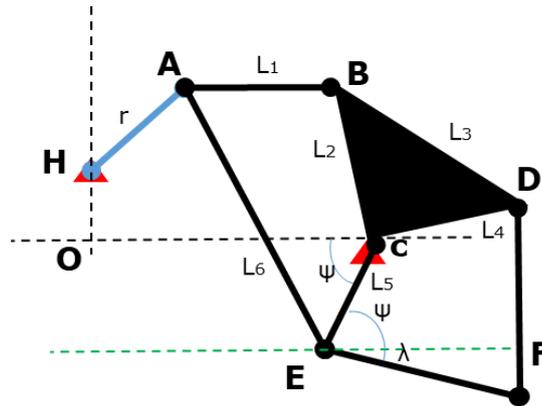
$$\psi = \cos^{-1} \left( \frac{L_5^2 + L_{AC}^2 - L_6^2}{2 * L_{AC} * L_5} \right) + \mu_2 \quad (5.13)$$

Assim, considerando  $L_5$  movendo-se em volta do ponto C, obtemos as coordenadas no ponto E:

$$E: \begin{cases} x_e = x_c + L_5 * \cos(2\pi - \psi) = x_c + L_5 * \cos(\psi) \\ y_e = y_c + L_5 * \sen(2\pi - \psi) = y_c - L_5 * \sen(\psi) \end{cases} \quad (5.14)$$

Para determinarmos o movimento do ponto F (Figura 31), devemos considerar a disposição a seguir, onde insere-se uma reta paralela ao eixo x, obtendo simetria entre os ângulos formados.

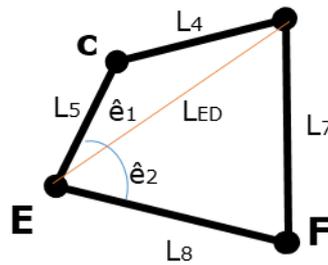
Figura 31 - Barra L7 e L8



Fonte: Elaboração Própria

Para podermos trabalhar trigonometricamente com as novas dimensões, passamos uma reta entre E e D, dividindo o paralelogramo em dois novos triângulos, como demonstrados na Figura 32:

Figura 32 - Paralelogramo CDEF



Fonte: Elaboração Própria

Dessa forma, pela lei dos cossenos obtemos:

$$L_4^2 = L_5^2 + L_{ED}^2 - 2 * L_5 * L_{ED} * \cos(\hat{e}_1) \quad (5.15)$$

$$\hat{e}_1 = \cos^{-1} \left( \frac{L_5^2 + L_{ED}^2 - L_4^2}{2 * L_{ED} * L_5} \right) \quad (5.16)$$

$$L_7^2 = L_8^2 + L_{ED}^2 - 2 * L_8 * L_{ED} * \cos(\hat{e}_2) \quad (5.17)$$

$$\hat{e}_2 = \cos^{-1} \left( \frac{L_8^2 + L_{ED}^2 - L_7^2}{2 * L_{ED} * L_8} \right) \quad (5.18)$$

Assim, através da igualdade  $\hat{e}_1 + \hat{e}_2 = \lambda + \psi$ , temos que o ângulo  $\lambda = \hat{e}_1 + \hat{e}_2 - \psi$  é portanto:



$$x_g = x_c + L_9 * \cos \left( -\cos^{-1} \left( \frac{1}{2} \frac{L_8^2 + L_9^2 - L_{10}^2}{2 * L_8 * L_9} \right) + \psi - \cos^{-1} \left( \frac{1}{2} A \right) - \cos^{-1} \left( \frac{1}{2} B \right) \right) - L_5 * \cos(\psi) \quad (5.22)$$

$$y_g = y_c + L_9 * \sen \left( -\cos^{-1} \left( \frac{1}{2} \frac{L_8^2 + L_9^2 - L_{10}^2}{2 * L_8 * L_9} \right) + \psi - \cos^{-1} \left( \frac{1}{2} A \right) - \cos^{-1} \left( \frac{1}{2} B \right) \right) - L_5 * \sen(\psi) \quad (5.23)$$

Onde:

$$A = \frac{[(L_4 * \cos(C) - L_5 * \cos(\psi))^2 - L_4^2 + L_5^2 + [L_4 * \sen(C) + L_5 * \sen(\psi)]^2}{L_5 \sqrt{[(L_4 * \cos(C) - L_5 * \cos(\psi))^2 + [(L_4 * \sen(C) + L_5 * \sen(\psi))]^2}} \quad (5.24)$$

$$B = \frac{[(L_4 * \cos(C) - L_5 * \cos(\psi))^2 - L_7^2 + L_8^2 + [L_4 * \sen(C) + L_5 * \sen(\psi)]^2}{L_8 \sqrt{[(L_4 * \cos(C) - L_5 * \cos(\psi))^2 + [(L_4 * \sen(C) + L_5 * \sen(\psi))]^2}} \quad (5.25)$$

$$C = \mu + \cos^{-1} \left( \frac{1}{2} \frac{L_2^2 + L_4^2 - L_3^2}{2 * L_2 * L_4} \right) \quad (5.26)$$

Com:

$$\mu: \begin{cases} D + E, & \text{para } y_a \geq 0 \\ D - E, & \text{para } y_a < 0 \end{cases} \quad (5.27)$$

$$\psi: \begin{cases} F - E, & \text{para } y_a \geq 0 \\ F + E, & \text{para } y_a < 0 \end{cases} \quad (5.28)$$

$$D = \cos^{-1} \left( \frac{\frac{1}{2} (y_h - y_c + r * \sen(\theta))^2 - L_1^2 + L_2^2 + (x_c - r * \cos(\theta))^2}{L_2 \sqrt{(y_h - y_c + r * \sen(\theta))^2 + (x_c - r * \cos(\theta))^2}} \right) \quad (5.29)$$

$$E = \cos^{-1} \left( \frac{\frac{1}{2} (y_h - y_c + r * \sen(\theta))^2 - r^2 * \cos^2(\theta) + x_c^2 + (x_c - r * \cos(\theta))^2 - (y_h + r * \sen(\theta))^2}{x_c \sqrt{(y_h - y_c + r * \sen(\theta))^2 + (x_c - r * \cos(\theta))^2}} \right) \quad (5.30)$$

$$F = \cos^{-1} \left( \frac{\frac{1}{2} (y_h - y_c + r * \sen(\theta))^2 + L_5^2 - L_6^2 + (x_c - r * \cos(\theta))^2}{L_5 \sqrt{(y_h - y_c + r * \sen(\theta))^2 + (x_c - r * \cos(\theta))^2}} \right) \quad (5.31)$$

### 5.3 OTIMIZAÇÃO DO MOVIMENTO

Theo Jansen, ao calcular seu mecanismo, tinha objetivos que divergem dos buscados em cenários com obstáculos, como os que justificam o presente trabalho. O holandês buscou o movimento que obedecia a um determinado formato, baseando-se na natureza e movimentos animais (os números encontrados por ele foram apelidados de “número mágicos” e encontram-

se na Tabela 9. Para o nosso caso, devemos modelar o movimento de modo que o robô atravesse obstáculos em deslizamentos ou explorando o desconhecido, superando vertical e horizontalmente. Como método de otimização, se optou por utilizar Algoritmo Genético, que será apresentado no presente capítulo.

**Tabela 9 - Números Mágicos de Theo Jansen**

$x_c$	38	$L_4$	40.1
$y_c$	0	$L_5$	39.3
$x_h$	0	$L_6$	61.9
$y_h$	7.8	$L_7$	39.5
$r$	15	$L_8$	36.7
$L_1$	50	$L_9$	49
$L_2$	41.5	$L_{10}$	65.7
$L_3$	55.8		

Fonte: Patnaik (2015)

Para toda otimização, devemos definir os objetivos e as restrições, aumentando a dificuldade de encontrar a condição ótima quanto maior for o número de variáveis.

Os objetivos de nossa otimização serão:

- Otimizar a amplitude horizontal do passo, permitindo que o robô supere buracos e vãos;

Para isso:

$$\text{Amplitude Horizontal} = \text{Máximo ponto X (MAX}(X_g)) - \text{Mínimo ponto X (MIN}(X_g))$$

$$O1 := \text{MAX}(\text{Amplitude Horizontal})$$

- Otimizar a amplitude vertical do passo; permitindo que o robô ultrapasse obstáculos;

Para isso:

$$\text{Amplitude Vertical} = \text{Máximo ponto Y (MAX}(Y_g)) - \text{Mínimo ponto X (MIN}(Y_g))$$

$$O2 := \text{MAX}(\text{Amplitude Vertical})$$

- Otimizar o número de pontos de contato com o solo, de forma que o movimento ao movimento apresentar maior equilíbrio e reduzir possibilidade de quedas.

Para isso:

$$\text{Solo} = \text{Arredondar } Y_g \text{ mínimo para 2 casas decimais}$$

$$\text{Contato\_Ponto} = \text{Se arredondar } Y_g \text{ para 2 casas decimais} = \text{Solo}$$

Contato (=1) #Condição Positiva

Sem contato (=0) #Condição Negativa

O3:= MAX(SOMATORIO(Contato\_Ponto))

Como todos os objetivos são máximos e não excludentes entre si, define-se o objetivo como a interseção entre os três objetivos, assim:

O:=MAX(O1\*O2\*O3)

### 5.3.1 Restrições

Para que a otimização seja bem-sucedida, deve-se considerar todas as situações em que a configuração é violada. Dessa forma, possuímos restrições geométricas a considerar, uma vez que existem duas barras triplas que são regidas pela lei dos cossenos e pela condição de existência de um triângulo (nenhum lado é menor que a diferença dos outros ou maior que a soma dos outros). A seguir, apresentam-se todas as restrições da configuração:

$$R1: = L_3^2 - L_2^2 - L_4^2 + 2 * L_2 * L_4 * \cos(\zeta - \mu) \quad (5.32)$$

$$R2: = L_{10}^2 - L_9^2 - L_8^2 + 2 * L_9 * L_8 * \cos(\rho - \lambda) \quad (5.33)$$

$$R3: = |L_2 - L_4| - L_3 \quad (5.34)$$

$$R4: = L_3 - (L_2 + L_4) \quad (5.35)$$

$$R5: = |L_3 - L_4| - L_2 \quad (5.36)$$

$$R6: = L_2 - (L_3 - L_4) \quad (5.37)$$

$$R7: = |L_2 - L_3| - L_4 \quad (5.38)$$

$$R8: = L_4 - (L_2 - L_3) \quad (5.39)$$

$$R9: = |L_8 - L_9| - L_{10} \quad (5.40)$$

$$R10: = L_{10} - (L_8 + L_9) \quad (5.41)$$

$$R11: = |L_8 - L_{10}| - L_9 \quad (5.42)$$

$$R12: = L_9 - (L_8 - L_{10}) \quad (5.43)$$

$$R13: = |L_9 - L_{10}| - L_8 \quad (5.44)$$

$$R14: = L_8 - (L_9 - L_{10}) \quad (5.45)$$

Como das restrições geométricas, para garantir a fluidez do movimento, foi adicionada uma nova restrição para evitar inversões bruscas. Dessa forma, criou-se critério para avaliar se, dentro de um ciclo de movimento, dois pontos (compostos por suas coordenadas) se repetem. Assim, a restrição foi criada como:

$$\text{Coordenada\_Ponto} = \text{Coordenada X do ponto (Xg)} - \text{Coordenada Y do ponto (Yg)}$$

$$\text{Choque\_Ponto} = \text{Se Contagem de Coordenada\_Ponto no conjunto Coordenadas} = 1$$

Sem choque (=0) #Condição Positiva

Com choque (=1) #Condição Negativa

$$\text{Total de Choques} = \text{Somatório do Conjunto de Choque\_Ponto}$$

Restrição (R15): **Total de Choques = 0**

### 5.3.2 Entradas da Otimização

As equações foram inseridas no software Microsoft Excel 2017, onde através da ferramenta Solver foram escolhidas as condições de contorno da otimização. As condições selecionadas foram as reunidas na Tabela 10 e apresentados os ambientes do sistema na Figura 34e na Figura 35 :

**Tabela 10 - Inputs para otimização**

Convergência	0,0001
Taxa de Mutação	0,075
Tamanho da População	200
Gerador Randômico	
Máximo tempo sem avanço	30

Fonte: Elaboração Própria

Onde:

- **Convergência (Convergence):** representa a porcentagem máxima de diferença entre os valores obtidos pelos 99% resultados superiores da população do Solver. Quanto menor o número, mais próximo da solução exata é encontrada.
- **Taxa de Mutação (Mutation Rate):** a taxa de mutação é um número entre 0 e 1 que representa a frequência relativa em que alguns números da população são alterados (ou

comutados) para criar uma nova tentativa de solução. Número mais elevados aumentam a diversidade da população assim como a variedade de soluções encontradas.

- Tamanho da População (Population Size): representa a quantidade de valores mantidos pelo sistema simultaneamente para aplicar o método de otimização.
- Gerador Randômico (Random Seed): representa a quantidade de números trocados durante o método de otimização. Ao deixar em branco, o sistema gera de modo aleatório uma nova quantidade de números a serem substituídos por ciclo.
- Máximo tempo sem avanço (Maximum Time without Improvement): é o número de segundos que o sistema aguarda para concluir a otimização sem que haja avanço mensurável nos valores encontrados na direção do objetivo.

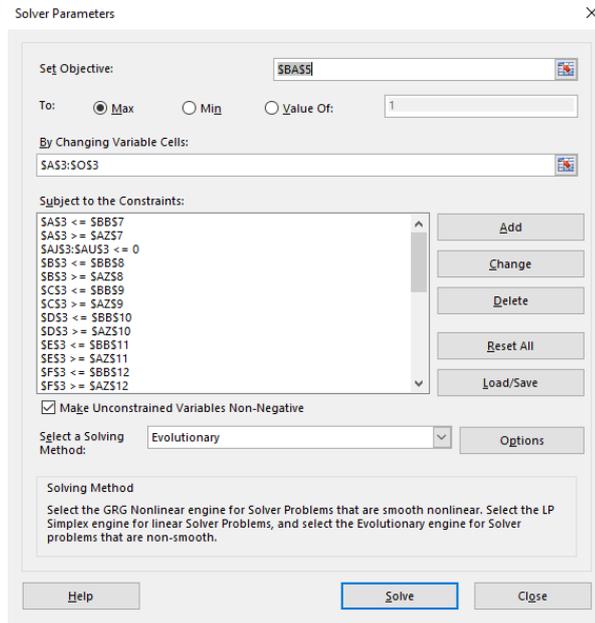
Dessa forma, processou-se as informações em um computador Lenovo T450, com processador Intel Core i5 – 5300U (2.30GHz), memória RAM de 8,00. Além disso, por conhecermos os números mágicos calculados por Theo Jansen e com o objetivo de diminuir os custos computacionais do projeto, restringimos a população de análise para intervalo próximo dos números, variando os limites inferiores e superiores da ordem de 5 unidades, como demonstra Tabela 11:

**Tabela 11 - Dimensões e Variação padrão**

Variável	Limite Inferior	Valor Inicial	Limite Superior	Variável	Limite Inferior	Valor Inicial	Limite Superior
xc	33,00	38,00	43,00	L4	35,10	40,10	45,10
yc	-5,00	0,00	5,00	L5	34,30	39,30	44,30
xh	-5,00	0,00	5,00	L6	56,90	61,90	66,90
yh	2,80	7,80	12,80	L7	34,50	39,50	44,50
r	10,00	15,00	20,00	L8	31,70	36,70	41,70
L1	45,00	50,00	55,00	L9	44,00	49,00	54,00
L2	36,50	41,50	46,50	L10	60,70	65,70	70,70
L3	50,80	55,80	60,80				

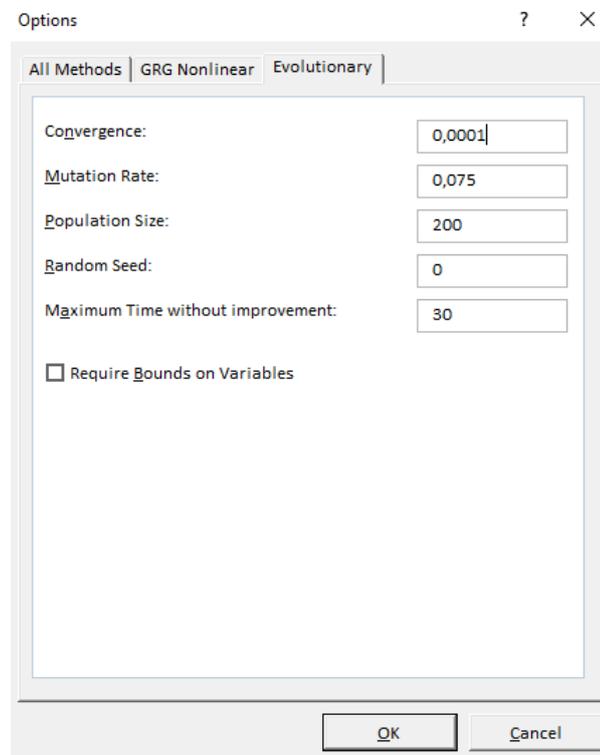
Fonte: Elaboração Própria

**Figura 34 - Ambiente do Solver do Excel para inserir condições e restrições, assim como o método de solução**



Fonte: Elaboração Própria

**Figura 35 - Ambiente do Solver para inserir condições da técnica de otimização evolucionária (Evolutionary)**



Fonte: Elaboração Própria

## 5.4 RESULTADOS

Após finalizado o processamento dos dados, o software utilizado retornou os parâmetros reunidos na Tabela 12, assim como apresentou os resultados relacionados a cada um dos objetivos definidos na Tabela 13.

**Tabela 12 - Parâmetros encontrados através do Algoritmo Genético**

$x_c$	39,77	$L_4$	37,53
$y_c$	0,02	$L_5$	37,03
$x_h$	0,00	$L_6$	56,90
$y_h$	-0,02	$L_7$	40,44
$r$	18,36	$L_8$	40,11
$L_1$	50,91	$L_9$	49,92
$L_2$	43,49	$L_{10}$	66,24
$L_3$	56,01		

Fonte: Elaboração Própria

Os números encontrados são em sua totalidade diferentes dos propostos inicialmente por Theo-Jansen em seu trabalho. A justificativa para tal diferença, considerando a utilização da mesma técnica de otimização, se deve ao objetivo de otimização. Enquanto o trabalho original buscava imitar o movimento realizado por animais, propondo os robôs como uma forma independente de vida, e buscando o mínimo de energia gasta com o movimento para permitir a continuidade do mesmo na natureza, o presente trabalho teve objetivos dimensionais. Para nós, o mais importante é ultrapassar e vencer obstáculo, mesmo sacrificando a suavidade do movimento e por sua vez tendo um leve aumento de consumo energético.

Vale ressaltar que esse aumento de consumo energético é compensado quando em ambientes de resgate e exploração (justificativas para o presente trabalho) quando considera-se a possibilidade de manobrabilidade atrelada ao baixo nível de controle requerido.

Os resultados da otimização foram apresentados na Tabela 13:

**Tabela 13 - Resultado dos objetivos da otimização**

Objetivos	Resultado da Otimização	Resultado de Theo-Jansen
Superação de obstáculos horizontais (O1)	80,43 (24,11 no ponto mínimo)	67,44 (3,32 no ponto mínimo)
Superação de obstáculos verticais (O2)	66,44	46,23
Pontos de contato com o solo (O3)	798 (22%)	131 (4%)
Pontuação de Otimização ( $O = O1 * O2 * O3$ )	696.557,74	33.324,04

Fonte: Elaboração Própria

Nesta tabela podemos identificar os resultados para os três objetivos e sua combinação. De maneira explicativa:

- Superação de obstáculos horizontais: é a distância ultrapassada ou “buraco/vala” máximo que é ultrapassado. Entre parênteses apresentamos a distância em que o robô permanece em contato com o solo considerando o ponto mínimo como único ponto de apoio. Esse número representa qual seria o avanço se desconsiderarmos a possibilidade de inserção de pés para apoio ou até mesmo mantendo a rigidez do robô absoluta.
- Superação de obstáculos verticais: é a altura superada ou “degrau” máximo que pode ser superado.
- Pontos de contato com o solo: levando em consideração que o terreno é quase perfeitamente plano, esse número mostra a quantidade de pontos em contato com o mesmo durante o movimento e sua porcentagem em relação ao número total de pontos do movimento, representando assim a proporção de movimento que de fato movimentou o robô.

Dessa forma, vemos a melhoria na superação de cada um dos objetivos definidos ao inserir as novas condições de entrada e restrições. O novo mecanismo proposto possuirá melhor desempenho para superar obstáculos desconhecidos ao mesmo tempo que garante maior firmeza com o solo. Este último ainda pode ser melhorado através de extensores flexíveis a serem acoplados ao ponto G.

Uma vez conhecidas as dimensões de entrada e o avanço horizontal de cada ciclo, é possível calcular também a velocidade de avanço, de forma a prever o movimento real. Dessa forma, considerando  $W$  a velocidade angular imposta à manivela, a velocidade linear do movimento será dada por:

$$\textit{Tempo Rotação} = \textit{Tempo de Avanço} \quad (6.1)$$

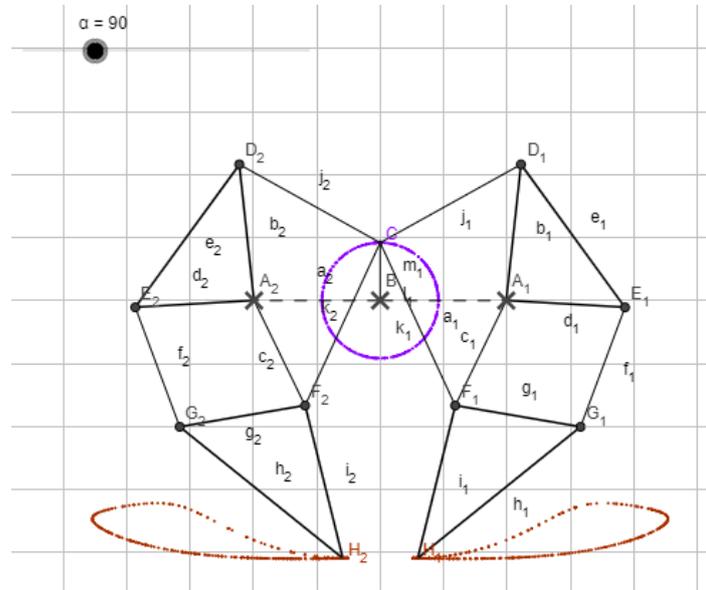
$$\frac{\textit{Perímetro da Manivela}}{\textit{Velocidade de Rotação}} = \frac{\textit{Avanço Xg}}{\textit{Velocidade de Avanço}} \quad (6.2)$$

$$\textit{Velocidade de Avanço} = \textit{Velocidade de Rotação} * \frac{\textit{Avanço Xg}}{\textit{Perímetro da Manivela}} \quad (6.3)$$

$$V = \frac{W * 0,1}{2 * \pi * r} = 0,7 * W \quad (6.4)$$

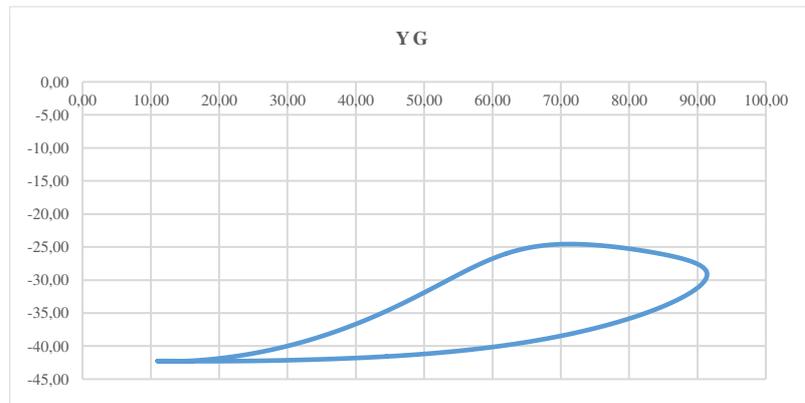
Para ter uma visão gráfica do modelo, foi construído o modelo através do aplicativo matemático gratuito online Geogebra (Figura 36) e do próprio Excel, utilizado para os cálculos (Figura 37).

**Figura 36 - Representação do mecanismo e do movimento modelado no Geogebra**



Fonte: Elaboração Própria

**Figura 37 - Representação do movimento do ponto G no Excel**

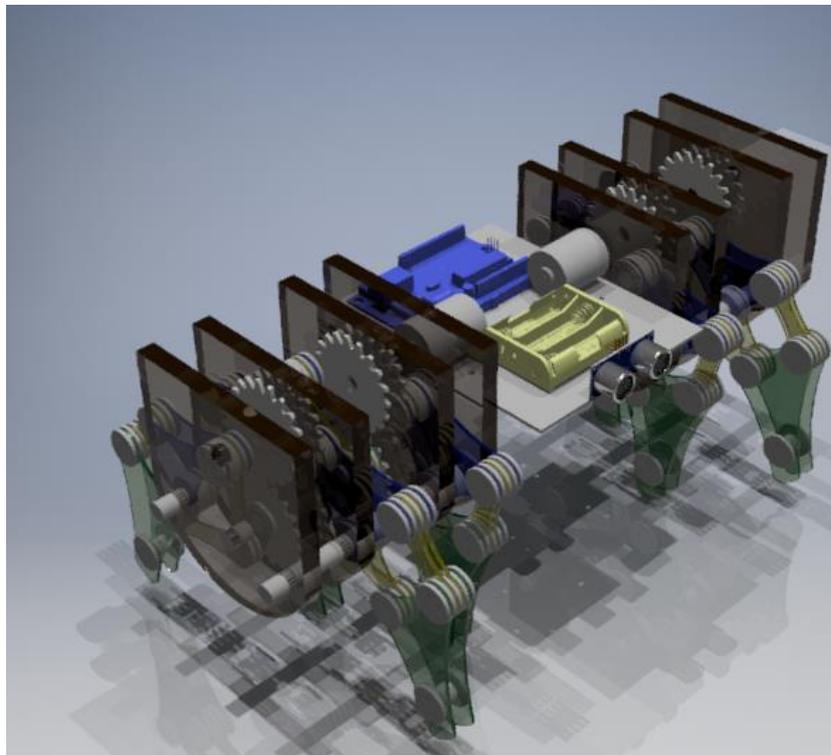


Fonte: Elaboração Própria

## 6 DESIGN DO MODELO

Obtidas as dimensões ótimas para a perna mecânica baseada no mecanismo de Theo Jansen, cabe propor uma estrutura de acoplamento e montagem para o robô que a utilizará, de forma a simular a composição final e adequação ao movimento desejado. Para o desenvolvimento do modelo, foi simplificado os componentes eletrônicos, apenas inserindo o básico para movimento (motores e controladores), levando em consideração no projeto o espaço para pay-load (carga paga) para sistemas futuros (p.e. câmeras de monitoramento, sistema de captura de dados). Além disso. A escala do projeto foi feita em milímetros (mm). O modelo projetado por ser visto na Figura 38.

**Figura 38 - Montagem modelo simplificado**



Fonte: Elaboração Própria

O software utilizado para desenvolvimento CAD foi o Autodesk Inventor 2016, executando em uma máquina ASUS S550CB com processador i7 3537U. A quantidade de pernas utilizadas foi o valor mínimo para permitir o equilíbrio, quatro grupos de pernas (oito pernas no total) é suficiente. Dessa forma, enquanto um grupo de duas pernas realiza o avanço, outro grupo garante a estabilidade junto ao solo.

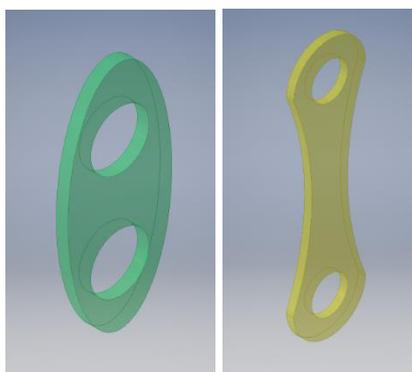
Os componentes utilizados estão listados na Tabela 14, a seguir:

**Tabela 14 - Descrição das Peças utilizadas na montagem**

Peça	Descrição	Quantidade
R1	Manivela Motriz, em acrílico 3mm	4
L1	Barra L1, em acrílico 3mm	4
L2L3L4	Barra Tripla L2L3L4, em acrílico 3mm	16
L5	Barra L5, em acrílico 3mm	8
L6	Barra L6, em acrílico 3mm	8
L7	Barra L7, em acrílico 3mm	16
L8L9L10	Barra Tripla L8L9L10, em acrílico 3mm	16
Suporte Perna	Suporte de apoio para as pernas e transmissão de movimento, em acrílico 3mm	8
Engrenagem	Engrenagem motora e movida para transmissão de movimento, em acrílico 3mm	16
Pino 1	Pino metálico 5 mm	40
Pino 2	Pino metálico 5 mm	8
Pino 3	Pino metálico 5 mm	4
Pino 4	Pino metálico 5 mm	4
Pino 5	Pino metálico 5 mm	4
Arruela	Arruela 2mm de espessura, em metal	256
Base Robô	Base de sustentação para conjunto e transporte de sensores e controlador. Colagem de chapas em acrílico 3mm	1
Controlador	Arduíno UNO	1
Atuador	Motor Akiyama 12V 6500 rpm	2

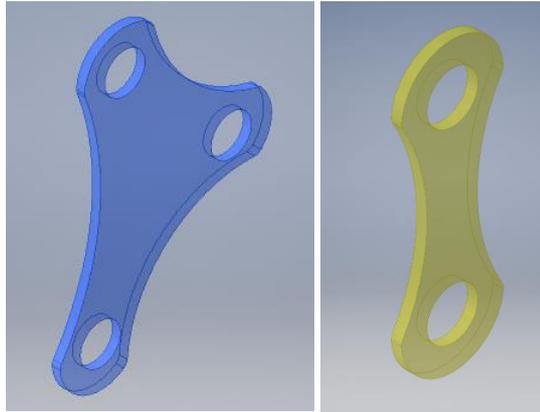
Fonte: Elaboração Própria

Para facilitar a visualização, as imagens compreendidas entre a Figura 39 e a Figura 43 apresentam as partes mais detalhadas.

**Figura 39 - Barra R1 (E) e Barra L1 (D)**

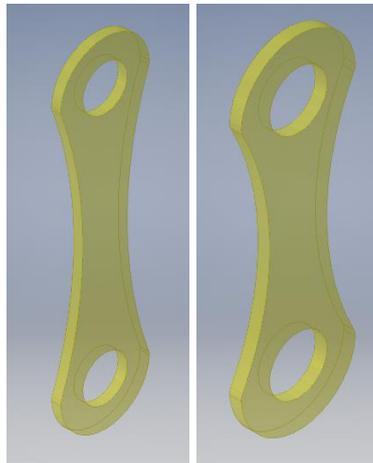
Fonte: Elaboração Própria

**Figura 40 - Barra Tripla L2L3L4 (E) e Barra L5 (D)**



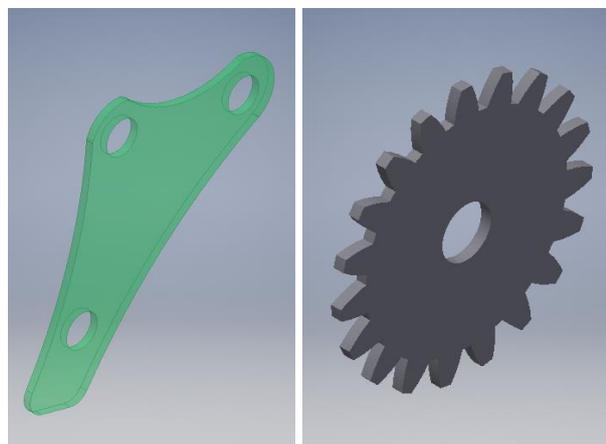
Fonte: Elaboração Própria

**Figura 41 - Barra L6 (E) e Barra L7 (D)**

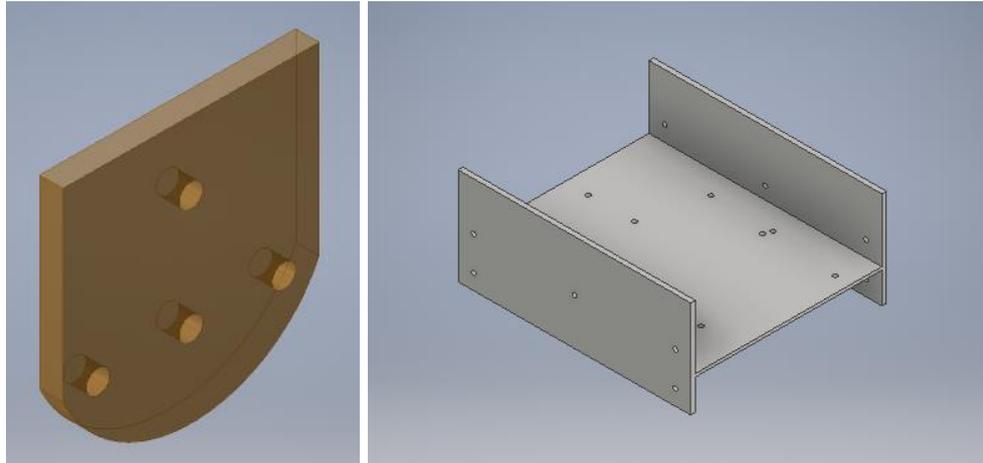


Fonte: Elaboração Própria

**Figura 42 - Barra Tripla L8L9L10 (E) e Engrenagem (D)**



Fonte: Elaboração Própria

**Figura 43 - Suporte Perna (E) e Suporte Robô (D)**

Fonte: Elaboração Própria

Após desenhar em plataforma CAD, foi iniciada a prototipagem do modelo, utilizando-se peças em acrílico. As peças foram cortadas através de cortadora a laser disponível no Laboratório de Objetos Urbanos Conectados (L.O.U.Co), vinculado à Prefeitura da Cidade do Recife. As peças foram então conectadas através de parafusos com 3/6” de espessura (dimensão comercial mais próxima do projetado) e cola Loctite Superbond. A cola foi específica pelo efeito de polimerização que exerce ao reagir com o acrílico, intensificando a resistência da junta. A versão da estrutura robótica, sem equipamentos, pode ser vista na Figura 44.

**Figura 44 – Protótipo em acrílico**

Fonte: Elaboração Própria

## 7 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo projetar um sistema robótico que fosse capaz de superar obstáculos de diversas dimensões em ambientes de resgate ou na exploração espacial, evitando colocar sobre riscos desnecessários vidas humanas e economizando recursos. Nesse contexto, optou-se pelo modelo mais simples de movimento robótico, com menos graus de controle e conseqüente menor custos de implantação, permitindo assim uma maior replicabilidade do sistema.

Para o projeto, utilizou-se a base de movimento um sistema proposto e estudado pelo inventor neerlandês Theo Jansen, conhecido como strandbeest. A partir desse mecanismo, foram definidos objetivos específicos para o novo projeto (diferentes do original), sendo necessário novos cálculos e otimização. Para a otimização do movimento, foi utilizado um método evolutivo, o Algoritmo Genético, que apresentou alto custo computacional, nos permitiu obter uma solução aplicável ao problema específico, obtendo resultados para todos os objetivos idealizados. É cogitável, em trabalhos futuros, utilizar outras ferramentas de machine learning, como Redes Neurais e Deep Learning, para encontrar soluções que interajam com outros componentes anexados ao robô.

Como o método utilizado para otimização é probabilístico, possivelmente alterando as entradas da otimização ou o sistema de cálculo se obtenha uma solução mais satisfatória para os objetivos pré-definidos, entendemos que o processo pode ser melhorado com o aumento do custo computacional.

Assim, pode-se concluir que é possível otimizar e desenvolver sistemas de locomoção para robôs com pernas, conforme diferentes objetivos, desta forma os robôs poderão estar preparados para evitar obstáculos (de dimensões relativas), se locomovendo em ambientes irregulares desconhecidos, auxiliando tarefas de resgate ou realizando novas descobertas.

Para o trabalho, foi iniciado o protótipo, como visto na seção anterior. Infelizmente, até a data de indexação do presente, não foi possível acoplar o eixo motor ao servomotor e assim validar o teste físico. Os mesmos testes serão explorados em trabalhos futuros.

## 8 PERSPECTIVAS

Diante da abrangência e limitação do presente trabalho, sugerem-se como motivação para continuação do projeto:

- Desenvolver e estudar diferentes lógica de otimização que considerem outros fatores internos e externos não identificados no presente trabalho, modificando as condições de restrição ou o objetivo;
- Determinar o conjunto de pernas que atenda os objetivos um a um, de modo a aumentar o número de potenciais obstáculos que podem ser superados;
- Desenvolver sistema de intercambiabilidade entre os objetivos;
- Desenvolver um protótipo robótico, dimensionando motores e equipamentos de controle para movimentos mais simples; e
- Realizar testes de campo com o modelo construído e utilizando pelo menos um sistema de pay-load aplicável a tarefas de resgate.

## REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, E. Star Wars BB8 ganha versão controlável por smartphone. Disponível em: <<http://www.uber7.com.br/outros/star-wars-bb-8-ganha-versao-controlavel-por-smartphone/>>. Acesso em 10 de abril de 2018.
- ARTFUTURA. Strandbeest de Theo Jansen. Disponível em <[http://www.artfutura.org/02/05jansen\\_en.html](http://www.artfutura.org/02/05jansen_en.html)>. Acesso em 13 de agosto de 2018.
- AZEVEDO, C. Introdução ao tema das Redes Bayesianas. Porto: Seminário de Modelação da FCUP, 2013.
- BASTOS, E.A. Otimização de Seções Retangulares de Concreto Armado Submetidas a Flexo-Compressão Obliqua utilizando Algoritmos Genéticos. Rio de Janeiro: Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2004.
- BROWN, A.S. Social Insects Inspire Design of Autonomous Robots. Disponível em: <<https://www.asme.org/engineering-topics/articles/robotics/social-insects-inspire-design-of-autonomous-robots>>. Acesso em 27 de outubro de 2018.
- CABRAL, M.C. O exército de robôs da Amazon. Disponível em: <<https://shifter.pt/2014/12/o-exercito-de-robos-da-amazon/>>. Acesso em 10 de abril de 2018.
- CAMPOS, R. Árvores de Decisão. Disponível em: <<https://medium.com/machine-learning-beyond-deep-learning/%C3%A1rvores-de-decis%C3%A3o-3f52f6420b69>>. Acesso em 18 de agosto de 2018.
- CRUZ, G. A história da robótica até os dias de hoje. Disponível em <<https://cienciaetecnologias.com/robotica-historia>>. Acessado em 06 de abril de 2018.
- DANGE, S.S. et al. Study on Theo Jansen Four Leg Walking Robot. Nashik: International Conference on Emanation in Modern Technology and Engineering. Volume 5, 2017.
- DE JONG, K.A. Evolutionary Computation: A unified approach. Cambridge: MIT Press, 2006
- DENG, L.; YU, D. Deep Learning: Methods and Applications. Foundations and Trends in Signal Processing, v6, n3-4, 2014.
- EXPERIENCE CURIOSITY. Learn About Curiosity. Disponível em: <<https://eyes.nasa.gov/curiosity/>>. Acessado em 13 de agosto de 2018.
- FARIA, F.A. Aprendizagem não supervisionada – Agrupamento (Clustering). São Paulo: Material de Aula da Universidade Federal de São Paulo, 2015.
- FERNEDA, E. Redes neurais e sua aplicação em sistemas de recuperação de informação. Brasília: CI. Inf, v35, n.1, 2006.
- FRANCISCO, P. Curiosity no Planeta Marte – Missão da NASA. Disponível em: <<http://www.siteastronomia.com/curiosity-planeta-marte-missao-nasa>>. Acesso em 10 de abril de 2018.
- HIGHLAND, L. BOBROWSKY, P. O Manual de Deslizamento – Um guia para a Compreensão de Deslizamentos. Reston: U.S. Geological Survey, 2008.

HOLTZ, G.C.C. Traçado automático de envoltórias de esforços em estruturas planas utilizando um algoritmo evolucionário. Rio de Janeiro: Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil- PUC-Rio, 2005.

ILLINOIS STATE. Unimate robot. Disponível em <[http://my.ilstu.edu/~kldevin/Introduction\\_to\\_robotics2/Introduction\\_to\\_robotics6.html](http://my.ilstu.edu/~kldevin/Introduction_to_robotics2/Introduction_to_robotics6.html)>. Acesso em: 10 de abril de 2018.

LORDGET. Hacking the Lego Mindstorm RCX with na Arduino part III: Line Follower. <<https://www.instructables.com/id/Hacking-the-Lego-Mindstorms-RCX-With-an-Arduino-Pa-1/>>. Acesso em 28 de setembro de 2018.

KOMODA, K; WAGATSUMA, H. A proposal of the extended mechanism for Theo Jansen linkage to modify the walking elliptic orbit and a study of cyclic base function. Japão.

MARS. Mars Global Surveyor. Disponível em: <<https://mars.nasa.gov/programmissions/missions/past/globalsurveyor/>>. Acesso em 13 de agosto de 2018.

MONARD, M.C.; BARANAUSKAS, J.A. Conceitos sobre Aprendizado de Máquina. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2003.

NASA. Why do we send robots to space? Disponível em: <<https://spaceplace.nasa.gov/space-robots/en/>>. Acesso em 13 de agosto de 2018.

NANSAI, S; ROJAS, N; ELARA, M.R.; SOSA, R; IWASE, M. On a Jansen leg with multiple gait patterns of reconfigurable walking platforms. SAGE: Advances in Mechanical Engineering, 2015.

OLIVEIRA, M. Robôs Aquáticos. Disponível em: <<http://revistapesquisa.fapesp.br/2007/11/01/robos-aquaticos/>>. Acesso em 10 de abril de 2018.

PATNAIK, S. Analysis Of Theo Jansen Mechanismo (Strandbeest) And Its Comparative Advantages Over Wheel Based Mine Escavation System. Chennai: IOSR Journal of Engineering, v. 05, n 07, p 43-52, 2015

PIERI, E.R., Curso de Robótica Móvel. Florianópolis: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina, 2002.

PITANGUI, C.G. Programação em lógica indutiva através de algoritmo estimador de distribuição e cláusula mais específica. Rio de Janeiro: Tese de Doutorado do Programa de Pós Graduação em Engenharia de Sistemas e Computação da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013

PRESSE, F. Deslizamento deixa mortos e desaparecidos na China. Disponível em <<https://g1.globo.com/mundo/noticia/deslizamento-soterra-centenas-na-china.ghtml>>. Acesso em: 04 de abril de 2018.

PSCHEIDT, E.R. Robô Autônomo – Modelo Chão de Fábrica. Curitiba: Monografia (Bacharelado) - UNICENP, 2007.

ROBONAUT. Robonaut 2 Technology Suite Offers Opportunities in Vast Range of Industries. Disponível em: <<https://robonaut.jsc.nasa.gov/R2/>>. Acesso em 13 de Agosto de 2018.

SIEGWART, R.; NOURBAKHSH, I. Introduction to autonomous mobile robots. London: Bradford Book, 2004

SILVA, M. F. S. Sistemas Robóticos de Locomoção Multipernas. Porto: Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2005.

STRANDEBEEEST. Theo Jansen's *Strandbeest*. Disponível em: <[http://www.strandbeest.com/beests\\_leg.php](http://www.strandbeest.com/beests_leg.php)>. Acesso em 16 de agosto de 2018.

THRUN, S. BÜCKEN, A. Integrating Grid-Based and Topological Maps for Mobile Robot Navigation. Portland: 13ª Conferência Nacional de Inteligência Artificial, 1996

TERRA. Robôs de resgate ajudam Japoneses após tragédia. Disponível em <<https://www.terra.com.br/noticias/tecnologia/robos/robos-de-resgate-ajudam-japao-apos-tragedia-conheca-os-principais,45289047462ea310VgnCLD200000bbcceb0aRCRD.html>>. Acesso em: 16 de junho de 2011.

TOOD, D.J. Walking Machines, an Introduction to Legged Robots. Londres: Kogan Page Ltd, 1985.

TORRES, C.M.S; FIDALGO, D.S.; SILVA, D.A.F.C.F; FONSECA, L.G.O.; DANTAS, R.G.R. Robôs no Espaço. Porto: Projeto de Mestrado – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2014.

WIKIPEDIA. R.U.R. Disponível em <<https://pt.wikipedia.org/wiki/R.U.R.>>. Acesso em: 10 de abril de 2018.

WOLF, D.F; OSÓRIO, F.S.; SIMÕES, E.; TRINDADE JR., O. Intelligent Robotics: From Simulation to Real Rowld Applications. São Carlos – SP: SBC – JAI, 2009