

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DE SÃO PAULO**

CAMPUS SÃO PAULO

RAFAEL PEREIRA BACHEGA

**DESENVOLVIMENTO DE UM ROBÔ HEXÁPODE PARA ESTUDOS DE
ADAPTAÇÃO DE CAMINHADA EM AMBIENTES NÃO ESTRUTURADOS**

**SÃO PAULO
2013**

RAFAEL PEREIRA BACHEGA

**DESENVOLVIMENTO DE UM ROBÔ HEXÁPODE PARA ESTUDOS DE
ADAPTAÇÃO DE CAMINHADA EM AMBIENTES NÃO ESTRUTURADOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, para obtenção do título de Mestre em Automação e Controle de Processos.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Brincalepe Campo.

Coorientador: Prof. Dr. Ricardo Pires.

SÃO PAULO
2013

RAFAEL PEREIRA BACHEGA

**DESENVOLVIMENTO DE UM ROBÔ HEXÁPODE VOLTADO PARA ESTUDOS
DE ADAPTAÇÃO DE CAMINHADA EM AMBIENTES NÃO ESTRUTURADOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Automação e Controle de Processos.

Aprovada em _____

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Alexandre Brincalepe Campo
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo

Prof. Dr. Alexandre Simião Caporali
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo

Prof. Dr. Renato Camargo Giacomini
Centro Universitário da FEI

*À minha família, por todo o apoio e
enorme incentivo em todas as etapas de
minha vida.*

Agradecimentos

Agradeço ao meu orientador, Professor Doutor Alexandre Brincalepe Campo e de igual forma, desejo agradecer meu coorientador, Professor Doutor Ricardo Pires, pelo tempo, energia, apoio e auxílio sempre que necessário fornecido durante a elaboração deste trabalho.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo – IFSP, por todas as oportunidades dadas.

Ao Professor Doutor Alexius Masiukewycz que se mostrou sempre disponível em auxiliar e esclarecer minhas dúvidas.

Desejo ainda agradecer a instituição SENAI – Roberto Simonsen. Em particular, ao Professor João Roberto Campaner, agradeço o fato de ter disponibilizado meios materiais ao seu alcance que facilitaram a evolução deste trabalho e me garantiu a dispensa do serviço docente para participação em conferências internacionais.

Ao Rosivaldo de Andrade Catão por contribuir em minha evolução acadêmica, permitindo acesso a diferentes recursos providos na escola.

Um obrigado ao amigo Marcus Piedade que me ajudou ao longo destes anos, sempre que o solicitei, adquirindo bibliografias que em muitos momentos permitiram a realização dos trabalhos conducentes a esta dissertação.

Agradeço a Tatiana Oliveira pelo tempo dedicado na leitura e pelas suas sugestões de revisão que permitiram o enriquecimento do texto desta dissertação.

Um agradecimento especial à Ana e Geir Biledt pelo esforço e incentivo em trazer os materiais necessários para o desenvolvimento deste projeto.

Um muito obrigado ao Professor Doutor Milton Torres pelo auxílio e revisão na elaboração das publicações geradas por esta pesquisa.

Às pessoas que sempre acreditaram e incentivaram a minha pessoa e que de uma forma direta ou indireta contribuíram para que este trabalho se concretizasse. Principalmente a toda minha família pela paciência, compreensão e apoio durante todo este tempo.

A todos aqueles que, eventualmente, ficaram esquecidos o meu mais sincero pedido de desculpas e o meu muito obrigado.

Resumo

O presente trabalho apresenta a construção do robô hexápode biologicamente inspirado (*MYRMEX-I*) para ser usado como plataforma de desenvolvimento experimental e validar arquiteturas de controle. O robô será controlado por meio de um FPGA (*Field Programmable Gate Array*). Sua principal contribuição é a criação de uma estrutura baseada em FPGA para a implementação dos algoritmos da cinemática inversa do robô, bem como introduzir sensores que permitem seu controle dinâmico, baseando na realimentação de forças. O controlador escolhido possibilitou a configuração para uma aplicação específica, um consequente ganho no desempenho aproveitando o paralelismo intrínseco desta arquitetura, e permite calcular as reações em tempo real. Para o controle, usou-se o programa gerador de módulos aritméticos FloPoCo – *Floating-Point Cores*, tendo por objetivo implementar a solução do algoritmo proposto para o robô hexápode desenvolvido. É feita a descrição da estrutura para esse tipo de robô, são apresentados os equacionamentos de seu modelo cinemático e proposta de trajetória do ponto de apoio das pernas, assim como, a configuração adotada para o FPGA. Durante a fase de desenvolvimento do robô (eletrônica e mecânica), foi possível encontrar os pontos com maiores níveis de tensão e compressão, a fim de enviar sinais para os transdutores, e medir indiretamente as forças de contato entre as pernas e o terreno. Os transdutores foram submetidos a experimentos e calibração que permitiram avaliar o seu desempenho. Este estudo permitiu alocar teoricamente nas melhores posições da estrutura mecânica um grupo de sensores, capazes de transmitir informações que representam o estado do robô e suas interações com o ambiente.

Palavras-chave: Sistemas biologicamente inspirados, robô hexápode, cinemática, sensoramento de força, controle dinâmico.

Abstract

This paper presents the configuration for a bio-inspired walking robot to be used as a development experimental platform in order to validate control architectures. Field Programmable Gate Array (FPGA) has the ability to accelerate the complex algorithms' computation. Even there aren't many libraries available which gives a standard of elementary functions, as exponentials, logarithms and trigonometrics. This article presents the use of a generator for arithmetic cores freely available for the creation of an FPGA-based framework for the implementation of the algorithms of hexapod robot inverse kinematics developing. The algorithm is configured on a dedicated hardware (based on a FPGA processor) to allow the system to operate without needing a microcomputer supporting. The controller allowed the chosen configuration for a specific application, a consequent gain in performance leveraging the inherent parallelism of this architecture allowing acceleration of complex algorithms and allowing calculate the reactions in real time. Basing on direct exploitation of the properties of a robot's mechanical structure, an approach for achieving force sensing is presented. During the robot's (electronic and mechanical) developmental phase, we were able to determinate knots with increases levels of tension and compression, in order to send signals to the strain gauges and to indirectly measure contact forces between the legs and the terrain. This study allowed us to theoretically allocate a group of strain gauges on the optimal positions in the mechanical structure so that they can accomplish the dynamic control of the robot.

Keywords: Biologically-inspired systems, hexapod robot, kinematics, force sensing, dynamic control.

*“Se, a princípio, a ideia não é absurda,
então não há esperança para ela.”*

Albert Einstein

Lista de Figuras

Figura 2.1: (a) Mecanismo de Chebyshev (Silva, 2005) e (b) Esboço da primeira máquina quadrúpede de L. A. Rygg (Raibert, 1986).....	28
Figura 2.2: Máquina quadrúpede Phoney Poney (Mcghee, 1966).	29
Figura 2.3: Veículo quadrúpede General Electric (Liston e Mosher, 1968).	30
Figura 2.4: Projeto realizado em 1985 – Estrutura mecânica do Adaptive Suspension Vehicle (Song e Waldron, 1989).	31
Figura 2.5: DANTE-II explorando o monte Spurr (Alasca) em 1994, medindo gases, temperaturas e monitorando o interior da cratera.	32
Figura 2.6: Robô <i>SIL06</i> desenvolvido para missões de desminagem (Santos <i>et al.</i> , 2006). ...	33
Figura 2.7: ROBOCLIMBER se posicionando em uma encosta rochosa para realizar uma operação de perfuração no solo.....	34
Figura 2.8: Robô BigDog desenvolvido para aplicações militares. (a) Robô com seu manipulador de objetos, (b) BigDog subindo um morro com inclinação de 30 graus, (c) Operador do robô (Raibert <i>et al.</i> , 2008).....	35
Figura 2.9: Protótipos de robôs biologicamente inspirados desenvolvidos pela Case Western Reserve University (CWRU), Robot II (esquerda) e Robot III (direita).	36
Figura 3.1: Primeira geração do robô biologicamente inspirado Myrmex-I com 18-DOF projetado para locomoção em ambientes não estruturados.....	39
Figura 3.2: Tórax com placa de controle FPGA (Spartan3).....	40
Figura 3.3: Parâmetros da notação de Denavit-Hartenberg (Laus, 2005).	43
Figura 3.4: Parâmetros cinemáticos do robô Myrmex-I. Vista 3D em corte para representação dos ligamentos e geometria das pernas com 3-DOF. Variáveis de juntas a serem determinadas pelo modelo cinemático inverso para trajetória do ponto de apoio da perna proposta.....	44
Figura 3.5: Polígono de suporte entre os pontos de apoio das pernas em contato com o solo.	47
Figura 3.6: Myrmex-I caminhando sobre superfície regular (deslocamento do robô em malha aberta).	49
Figura 3.7: Algoritmo aplicado para resolver o problema da cinemática inversa do Robô Hexápode.	51
Figura 4.1: Resultados dos módulos (a) cosseno e (b) seno com o ajuste de entrada para cálculo de ângulos no intervalo de $[-\pi/2$ a $\pi/2]$	59
Figura 4.2: Configuração para implementação da cinemática em FPGA – Step1.	60
Figura 4.3: Configuração para implementação da cinemática em FPGA – Step2.	63
Figura 4.4: Configuração para implementação da cinemática em FPGA – Step3.	66
Figura 5.1: Curva tensão (σ) x deformação (ϵ) do alumínio.	67
Figura 5.2: Deformação no segment LK2 – Análise estática linear – 15N.....	68
Figura 5.3: Análise de forças no conjunto de uma das pernas do robô.	69

Figura 5.4: Alocação dos extensômetros no LK2 na configuração ponte completa de Wheatstone para medidas de forças.	70
Figura 5.5: Resultados de calibração e desempenhos aproximadamente lineares dos transdutores de força medidos nas direções normal e lateral em ambos os sentidos.	72
Figura 5.6: Tensões constantes medidas nas saídas amplificadas das pontes de	73
Figura 5.7: Exemplos de configurações adotadas no experimento: (a) vista lateral e perspectiva – seis pernas em contato com o solo; (b) vista frontal e lateral – trípede com P1, P3 e P5 em contato com o solo.	75
Figura 6.1: Sistema para identificação das pernas do robô, usado em todos os experimentos.	78
Figura 6.2: Esforços em situação estática (a). Posição de referência ajustadas para simulações estáticas e dinâmicas (b).	79
Figura 6.3: Comparação (posição de referência) com posição estática inclinada (robô posicionado de frente com uma inclinação de 30° em relação ao plano).	79
Figura 6.4: Comparação (posição de referência) com posição estática inclinada (robô posicionado de costas com uma inclinação de 30° em relação ao plano).	80
Figura 6.5: Comparação (posição de referência) com posição estática inclinada (robô posicionado de lado (esquerdo) com uma inclinação de 30° em relação ao plano).	80
Figura 6.6: Comparação (posição de referência) com posição estática inclinada (robô posicionado de lado (direito) com uma inclinação de 30° em relação ao plano).	80
Figura 6.7: Experimentos dinâmicos - robô em situação de estabilidade estática no plano regular, levantando-se após aproximadamente 30 segundos.	81
Figura 6.8: Caminhada trípede em superfície plana – a) representa os dados relativos às pernas do lado direito – b) representa os dados das pernas do lado esquerdo do robô.	82
Figura 6.9: Caminhada trípede em superfície plana (segunda simulação) – a) representa os dados relativos às pernas do lado direito – b) representa os dados das pernas do lado esquerdo do robô.	83

Lista de Tabelas

Tabela 3.1: Massa dos components do Robô Hexápode Myrmex	40
Tabela 3.2: Parâmetros cinemáticos (notação de Denavit-Hartenberg) do Robô Hexápode. ...	46
Tabela 4.1: Codificação com 12 bits, para os ângulos de entrada dos blocos.....	55
Tabela 4.2: Valores de entrada para o módulo cosseno.	57
Tabela 4.3: Valores de entrada para o módulo seno.....	58
Tabela 4.4: Codificação com 12 bits, para os ângulos de entrada dos blocos.....	61
Tabela 5.1: Massas de Referência para Calibração.	71
Tabela 5.2: Medidas de Tensão na Direção Normal.	71
Tabela 5.3: Medidas de Tensão na Direção Lateral	71
Tabela 5.4: Intensidades de correntes nos motores – seis pernas no solo.	75
Tabela 5.5: Intensidades de correntes nos motores – pernas (4,6 e 2) apoiadas.	76
Tabela 5.6: Intensidades de correntes nos motores – pernas (1,3 e 5) apoiadas.	76
Tabela 5.7: Correntes consumidas nos motores – pernas (1,3,4, e 6) apoiadas.	77

Sumário

Lista de Figuras	i
Lista de Tabelas.....	i
Sumário	ii
Capítulo 1 : Introdução.....	22
Capítulo 2 : Revisão da Literatura	26
2.1 Estudos em Robôs Móveis com Pernas.....	26
2.1.2 Pesquisas Desenvolvidas	27
Capítulo 3 : Descrição do Robô Hexápode Myrmex-I	38
3.1 Estrutura Mecânica	38
3.1.1 Estrutura das Pernas	39
3.2 Controle	40
3.3 Descrição Física e Modelagem.....	41
3.3.1 Modelagem Cinemática Direta.....	42
3.3.2 Modelagem Cinemática Inversa	47
3.3.2.1 Matriz Jacobiano	49
Capítulo 4 : Implementação, em FPGA, do Módulo da Cinemática Inversa.	54
4.1 Gerador de Módulos Aritméticos – FloPoCo.....	54
4.2 Configuração do Modelo Cinemático em FPGA	60
Capítulo 5 : Implementação dos Transdutores.....	67
5.1 Análise dos Esforços	67
5.2 Alocações dos Sensores.....	69
5.2.1 Procedimentos de Calibração	70
5.2.2 Avaliação Experimental – Extensômetros.....	74
5.3 Intensidades de Correntes nos Motores	74
Capítulo 6 : Resultados e Simulações	78
6.1 Estudo Estático	78

6.2 Estudo Dinâmico	81
Capítulo 7 : Conclusão, Discussões dos resultados e Perspectivas de Desenvolvimentos Futuros	84
Referências Bibliográficas	86
Glossário.....	89

Capítulo 1 : Introdução

Robôs autônomos móveis são máquinas com habilidades de realizar movimentos em ambientes estruturados e não estruturados sem intervenção explícita humana. Sua autonomia é obtida com o uso eficiente de algoritmos de controle, capazes de lidar com situações diferentes, apresentar autonomia de modo a prolongar o ciclo de trabalho e estender o tempo de operação do robô. Isto é especialmente significativo, na locomoção de robôs móveis com pernas, que se movem ao longo de um determinado caminho com as pernas em distintas posições no espaço, provocando diferentes consumos de energia.

Mecanismos com pernas podem transpor obstáculos efetuando pontos de contato com o solo, atravessar valas e descontinuidades no terreno com dimensões comparáveis ao tamanho do corpo do robô, podendo permanecer nivelados e estáveis. Introduzem um efeito de amortecimento e desacoplamento entre as irregularidades do terreno e o corpo do robô, que minimiza o consumo energético e maximiza a estabilidade (Song e Waldron, 1989).

Vários mecanismos com pernas foram desenvolvidos e estão sendo estudados, como o robô com seis pernas, designado robô hexápode. Um robô hexápode consiste de uma plataforma denominada corpo do robô, dotada de seis pernas iguais, formadas por mecanismos seriados com diversos tipos de estruturas. Podem atuar em meios submarinos, áreas radioativas, crateras vulcânicas, ambientes espaciais e terrestres, superando a maioria dos problemas de locomoção em terrenos acidentados. Apesar de receberem grande atenção entre os pesquisadores, os estudos de locomoção desenvolvidos até esta data apresentam mobilidade limitada, e de fato, nenhum deles exhibe capacidades que se aproximam das reveladas por sistemas biológicos. As razões para esta lenta evolução do controle das pernas e coordenação é devido ao comportamento cinemático complexo, limitado conhecimento de padrões de locomoção e complexidade de projetar estruturas mecânicas eficientes (Silva *et al.*, 2005).

Seu deslocamento caracteriza-se pela coordenação harmônica das pernas no movimento de locomoção. Esse deslocamento produz contatos com o terreno ao longo de uma

determinada marcha, resultando em um padrão mutável de forças de reação que, em última análise, determina a estabilidade global do robô (Estremera e Santos, 2003).

O bom desempenho de locomoção dos robôs hexápodes em terrenos irregulares pode ser obtido com o auxílio de sensores, capazes de transmitir informações que representem o estado do robô e suas interações com o ambiente. O controle em malha fechada utilizando as informações fornecidas por esses sensores pode melhorar a capacidade do caminhar. Por esta razão, a comunidade científica tem se dedicado ao desenvolvimento de estratégias de controle de forças baseado em medições durante a locomoção, resultando em evidentes vantagens que podem ser obtidas, tais como: aperfeiçoar o caminhar, minimizar o consumo de energia, evitar o risco de deslizamento do pé, investigar distribuição de forças e expandir capacidades operacionais (Kaliyamoorthy, 2001; Preumont, 1991 e Marhef, 1998).

A grande maioria dos estudos concentraram suas pesquisas de locomoção em terrenos planos, sendo que normalmente, durante a locomoção, o robô segue uma direção definida de movimento e velocidade e, em seguida, os algoritmos de controle tentam manter estes parâmetros. À medida que aumentam a complexidade dos ambientes e tarefas para os robôs autônomos, a dificuldade de projetar sistemas de controle torna-se um fator limitante para o grau de complexidade funcional que pode ser alcançado (Gorinevsky *et al.*, 1997).

Para o controle, é evidente que as pernas devam estar equipadas com sensores de força. Os *strain gauges* (extensômetros) são os transdutores mais comumente utilizados na medição de força, fornecendo alta sensibilidade e exatidão da medida. A principal desvantagem do uso desses transdutores é a sua sensibilidade à temperatura, que deve ser neutralizada por métodos especiais (Gorinevsky *et al.*, 1990) e (Orin e Oh, 1981). Estudos têm sido publicados sobre a aplicação experimental do controle de forças nas pernas, e algoritmos de aprimoramento de distribuição de forças foram desenvolvidos, utilizando programação linear, quadrática e pseudo-inversa (Kumar, 1988 e Jiang, 2004).

O uso de programação linear ou quadrática para aperfeiçoar a distribuição das reações de forças, é dificultado, na prática, devido à necessidade de calcular as reações em tempo real. Portanto, a maioria das publicações contém apenas resultados de simulações. O método da pseudo-inversa é amplamente utilizado porque resolve as equações rapidamente, minimizando a soma dos quadrados das forças da perna (Zomaya, 1995). Porém, dada necessidade de calcular as reações, um sistema robótico operado em tempo real precisa de um processo

iterativo para a execução de complexos algoritmos. Esses algoritmos envolvem o uso de várias funções transcendentais e operações aritméticas que requerem alto poder computacional, superando as capacidades de muitos computadores sequencias baseados na arquitetura Von Neumann. A implementação em dispositivos reconfiguráveis como FPGAs (*Field Programmable Gate Array*) permitiria a configuração para uma aplicação específica, aproveitando o paralelismo intrínseco desta arquitetura tendo um consequente ganho no desempenho. Isso permite a rápida execução de algoritmos complexos em aplicações científicas como: processamento digital de sinais e imagens e cálculos cinemáticos e dinâmicos em robótica, que muitas vezes precisam de um alto número de operações aritméticas e trigonométricas calculadas com precisão (Wang, 2007). A adoção de aritmética de ponto flutuante baseada no padrão IEEE-754 é um requisito indispensável para este tipo de aplicações, geralmente implementadas sobre processadores de propósito gerais (Hartenstein, 2007).

O presente trabalho busca a construção de um robô hexápode (*MYRMEX-I*) controlado por meio de um FPGA. Sua principal contribuição é a criação de uma configuração em FPGA para a implementação dos algoritmos da cinemática do robô, bem como introduzir sensores que permitirão seu controle dinâmico baseado na realimentação de forças por meio destes transdutores e sensores de corrente nos motores. Usou-se o programa gerador de módulos aritméticos FloPoCo – *Floating-Point Cores* (Detrey e Dinechin, 2007) , tendo por objetivo implementar a solução do algoritmo proposto para o robô hexápode desenvolvido.

Este desenvolvimento deve atender às seguintes características:

- i) Construir um robô biologicamente inspirado para ser usado como plataforma de desenvolvimento experimental para validar técnicas de controle.
- ii) Desenvolver uma configuração para solucionar o problema da cinemática inversa do robô hexápode em um FPGA.
- iii) Dotá-lo com um sistema de percepção capaz de identificar esforços em sua estrutura mecânica.

Neste capítulo, foram introduzidos aspectos relacionados a sistemas robóticos realimentados por força. Ao final, foram estabelecidos os objetivos deste trabalho. Dados os objetivos anteriormente citados, propõe-se, além do capítulo introdutório, o desenvolvimento de mais seis capítulos que estabelecem a situação atual do projeto com a seguinte estrutura:

No Capítulo 2 serão apresentadas, de forma sucinta, algumas classificações na área de sistemas robóticos com pernas, assim como a revisão literária que através de uma descrição analítica, apresenta os diversos desenvolvimentos de sistemas realimentados por força.

O Capítulo 3 descreve o robô hexápode desenvolvido, suas principais características, configuração física, definição dos sistemas de referência e as características básicas consideradas na sua modelagem cinemática com o qual este trabalho busca também contribuir.

A abordagem e implementação do controle no FPGA, destacando o uso do programa FloPoCo para solução da cinemática, é descrito no Capítulo 4.

No Capítulo 5, por sua vez, busca-se acrescentar a maneira pela qual foi feita a aplicação experimental, calibração dos transdutores ao sistema das pernas, monitoração das intensidades de corrente nos motores e análise experimental de cada uma delas.

Finalmente, o Capítulo 6 relaciona os métodos abordados e os resultados alcançados, e o Capítulo 7 apresenta a conclusão e a linha de estudo a ser seguida.

Capítulo 2 : Revisão da Literatura

Neste capítulo apresenta-se uma breve introdução às diferentes formas possíveis de locomoção em robôs móveis, dando ênfase a robôs móveis com pernas e mostrando as suas vantagens e limitações.

2.1 Estudos em Robôs Móveis com Pernas

Sistemas biologicamente inspirados têm sido usados por muitos pesquisadores nas últimas décadas. Com a crescente evolução na área robótica, os sistemas atuais podem ser classificados em robótica de manipulação e robótica móvel. No que pertence à robótica móvel é, relativamente, a forma adotada de se locomover, tornando-se necessário considerar aspectos como: restrições do terreno, limitação dos atuadores, tarefas a serem cumpridas, bem como a fonte de alimentação e autonomia energética. Com estas considerações e trabalhos revisados até o momento, podem ser adotadas para locomoção de robôs móveis: mecanismos com rodas, pernas e estruturas articuladas.

Mecanismos com rodas exigem superfícies regulares para se deslocarem, sendo extremamente rápidos e eficientes, podendo apresentar estruturas físicas simples e leves. Entretanto, Song (1989) afirma que mais de 50% da superfície terrestre é inacessível a veículos com rodas. Segundo o autor, a complexidade do deslocamento de veículos com rodas está em vencer obstáculos e desníveis com grandes dimensões que superam o raio de suas rodas.

Mecanismos com pernas possuem uma maior mobilidade em terrenos naturais e irregulares quando comparados a sistemas com rodas. Essas estruturas podem utilizar apoios isolados para cada perna, diferentemente de mecanismos com rodas que necessitam de uma superfície de suporte contínua. Robôs móveis com pernas podem transpor obstáculos efetuando pontos de contato com o solo, atravessar valas e descontinuidades no terreno com dimensões comparáveis ao tamanho do corpo do robô podendo permanecer nivelados e

estáveis. Introduzem um efeito de amortecimento e desacoplamento entre as irregularidades da superfície e o corpo do robô, que minimiza o consumo energético e maximiza a estabilidade. Por esse motivo, mecanismos com pernas são inerentemente adequados para locomoção em superfícies irregulares (Silva *et al.*, 2005).

Bekker (1960) estudou que a energia necessária para sair de depressões é inferior em sistemas com pernas, uma vez que estes, deformam o terreno numa menor escala em relação a mecanismos com rodas. Pesquisas recentes (Yang e Kim, 1998; Roennau *et al.*, 1998; Spenneberg, *et al.*, 2004) mostram tolerância à falhas durante a locomoção em robôs móveis com pernas, pois estes podem apresentar redundância no número de pernas e com isso manter a estabilidade estática caso haja perda ou falha de alguma. Uma severa perda de mobilidade resultaria no caso de falha em um sistema com rodas, visto que mecanismos desta natureza devem estar sempre em contato com o solo durante sua locomoção.

Apesar de receberem grande atenção entre os pesquisadores, os estudos de locomoção desenvolvidos até esta data apresentam mobilidade limitada devido ao comportamento cinemático complexo. Seu deslocamento caracteriza-se pela coordenação harmônica das pernas no movimento de locomoção. No estado atual de desenvolvimento, estes robôs ainda sofrem grandes limitações como: baixas velocidades, algoritmos de controle complexos, dificuldade de construção e dependendo do número de atuadores para mover as pernas com múltiplos graus de liberdade, podem apresentar consumo energético elevado.

Após esta breve introdução dando ênfase às características e locomoção dos robôs móveis com pernas, apresentam-se na seção seguinte os principais pontos de estudo e revisão da literatura para o escopo deste trabalho. São apresentados através de uma análise sucinta, mostrando seus métodos e principais resultados, com realce para a cinemática, estrutura mecânica desenvolvida, sensores e *hardware* utilizados para o controle.

2.1.2 Pesquisas Desenvolvidas

Apresentam-se a seguir, através de uma revisão analítica, os diversos desenvolvimentos relativos a robôs móveis de locomoção por pernas, efetuando uma resenha histórica destes sistemas considerados marcos na evolução. São examinados alguns sistemas atuais e suas diversas aplicações, procurando dar ênfase aos robôs hexápodes. As principais

metas são as de revisar o conhecimento existente na área e analisar como o assunto tem sido abordado até o presente momento.

O primeiro modelo para um sistema de locomoção com pernas foi apresentado por L. A. Rygg e patenteado 1893. A máquina quadrúpede, denominada *The Mechanical Horse* utilizava um sistema desenvolvido em 1850, pelo matemático Russo Chebyshev. No qual recorria a uma ligação cinemática para mover o corpo ao longo de uma trajetória reta horizontal, enquanto as pernas se moviam para cima e para baixo para trocar o suporte durante a locomoção.

Ao rodar o braço AB (Fig. 2.1.a) da engrenagem, o ponto M (representando o pé do sistema de locomoção) desloca-se sobre uma trajetória em linha reta durante uma parte do ciclo e sobre uma trajetória em arco durante o restante da parte do ciclo (trajetória de saída). Duas engrenagens operam defasadas de forma que, em qualquer instante, pelo menos uma delas fornece o movimento linha reta.

O corpo (representado pelo seguimento BC) encontra-se sempre suportado pelo pé que se encontra ligado à engrenagem que se desloca segundo a trajetória reta horizontal (Silva, 2005).

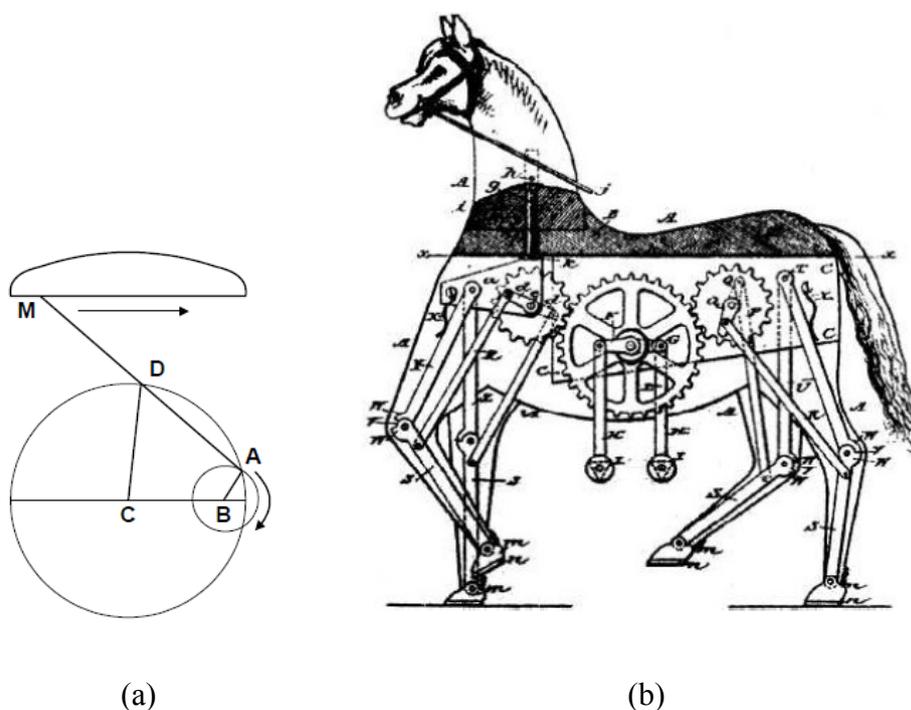


Figura 2.1: (a) Mecanismo de Chebyshev (Silva, 2005) e (b) Esboço da primeira máquina quadrúpede de L. A. Rygg (Raibert, 1986).

A máquina desenvolvida por Rygg apresentada na Fig. 2.1.b, não chegou a ser construída e o seu movimento era transmitido às pernas através de um conjunto de engrenagens. A direção do veículo (cabeça e pernas dianteira) eram controladas pelas rédeas.

Segundo Raibert (1986), até meados do século vinte as pesquisas sobre máquinas que caminham procurava soluções baseada no uso de engrenagens para transmitir o movimento das pernas. Restringindo os mecanismos a adotar um padrão de locomoção constante, que impossibilitava a adaptação do caminhar em tempo real e a informação sobre o estado da máquina e o ambiente não era utilizado em seu controle.

Durante os anos 60, Mcghee e Frank desenvolveram o *Phoney Poney* (Fig. 2.2). Este quadrúpede, concluído em 1966, foi o primeiro robô com pernas a ser controlador por um computador. Cada perna possuía dois graus de liberdade, e os motores de cada articulação tinham um redutor de velocidade.

A coordenação das juntas era feita através de lógica digital simples e apresentava dois padrões de locomoção diferentes. Sua principal limitação era o fato de não conseguir mudar sua direção e deslocar-se apenas em linha reta (Mcghee, 1966).

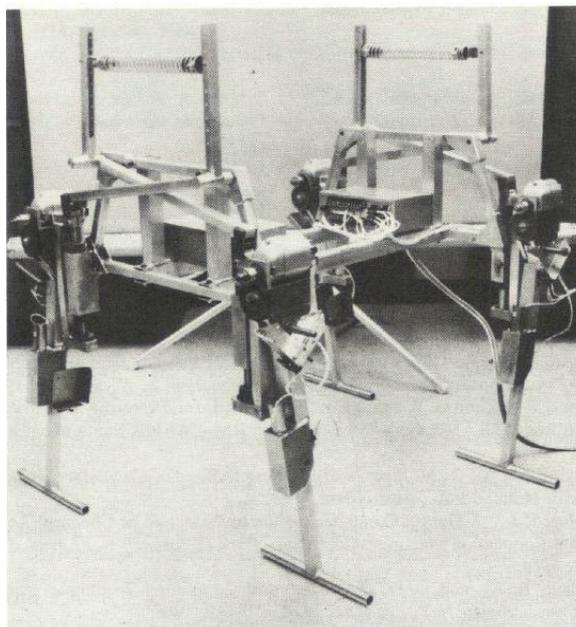


Figura 2.2: Máquina quadrúpede Phoney Poney (Mcghee, 1966).

Nesta mesma época Mosher construiu um dos primeiros veículos capaz de adotar diferentes padrões de locomoção. O *General Electric Walking Truck* (Fig. 2.3) possuía 3,3 m de altura, 3m de comprimento e pesava 1400 Kg. Apresentava três graus de liberdade por perna e um operador controlava as quatro pernas do veículo através de punhos e pedais que se encontravam hidraulicamente ligados às pernas do robô. Verificou-se que apesar do bom desempenho (aptidão para vencer obstáculos e boa mobilidade) era necessário que o sistema fosse controlado por um computador, devido o cansaço de operar doze graus de liberdade (Liston e Mosher, 1968).

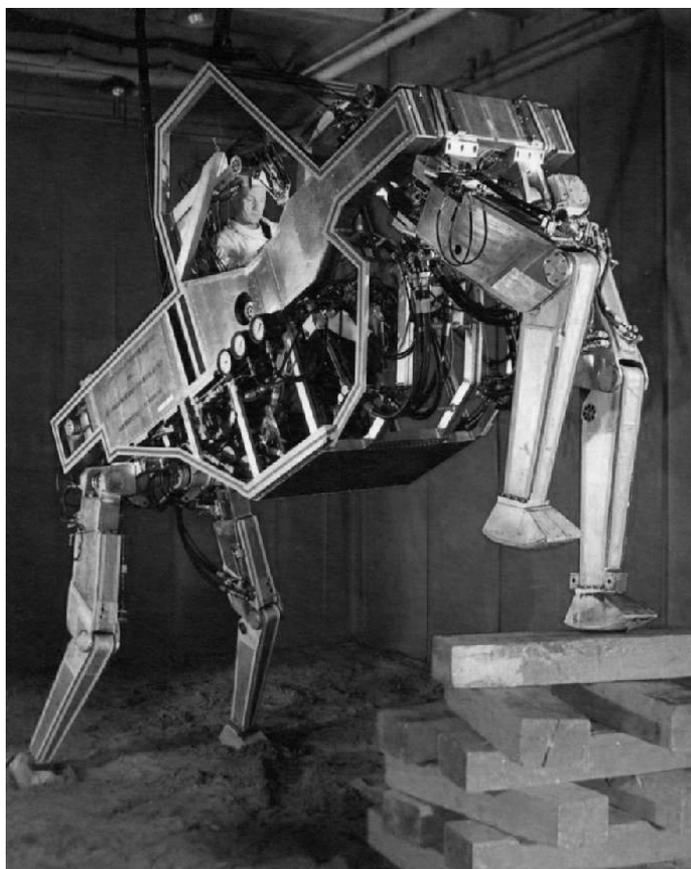


Figura 2.3: Veículo quadrúpede General Eletric (Liston e Mosher, 1968).

Song e Waldron (1989) apresentam o ASV (*Adaptive Suspension Vehicle*), um robô hexápode desenvolvido pela Universidade do Estado de Ohio em conjunto com a Universidade de Wisconsin. O veículo possui uma massa de aproximadamente 2600 kg e um comprimento de 5 metros (Fig. 2.4). Seus atuadores são hidráulicos, acionados por um motor

de combustão interna e seu controle de velocidade e direção de locomoção, executado por meio de um operador. O robô tem como principais características: capacidade de carga de 250 kg, a possibilidade de subir uma inclinação máxima de 60%, ultrapassar valas e descontinuidades do terreno com larguras de até 1,8 m, subir degraus ou transpor obstáculos de até 1,7 m de altura e atingir velocidades de até 2,3 m/s em superfícies regulares.

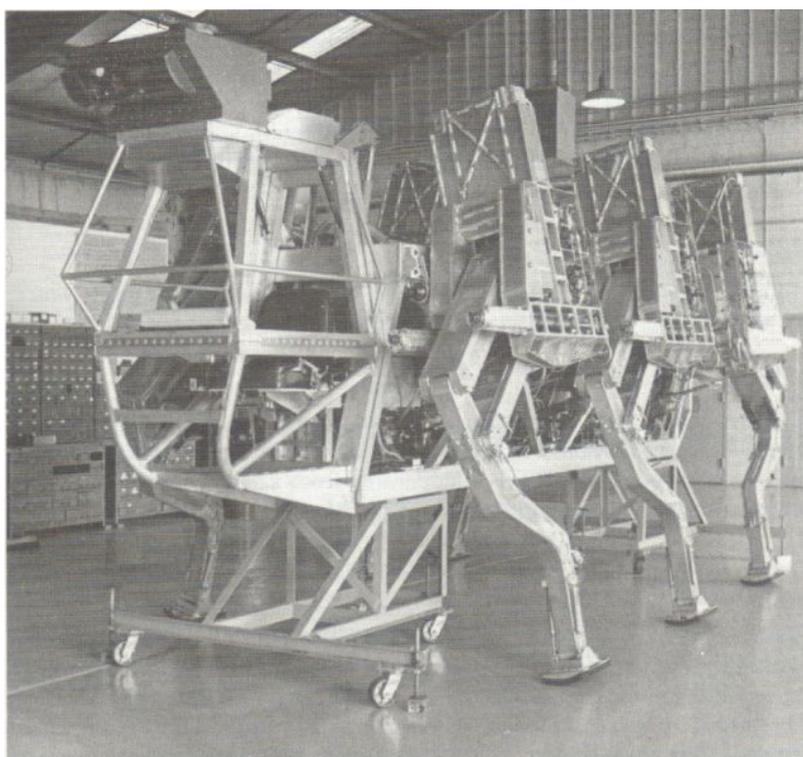


Figura 2.4: Projeto realizado em 1985 – Estrutura mecânica do Adaptive Suspension Vehicle (Song e Waldron, 1989).

O robô DANTE-II, desenvolvido pela *CMU Field Robotics Center (Carnegie Mellon University)* e patrocinado pela *NASA (National Aeronautics and Space Administration)*, é um robô octópode desenvolvido para explorar, coletar matérias e dados para estudos em crateras vulcânicas (Fig. 2.5). Sua primeira contribuição foi a exploração do Monte Spurr (Aleutian Range) no Alasca em julho de 1994. O robô recebe instruções dos operadores remotos, sendo capaz de recolher e analisar os gases de alta temperatura do solo da cratera (Bares e Wettergren, 1999).

Suas pernas agem em conjunto, alternando entre a fase de transferência e suporte. Durante a locomoção, seus movimentos são esteticamente estáveis, porém, eventos dinâmicos (deslizamentos e colisões) afetam seu desempenho. Utilizou-se, por isso, um sistema de *rapel* para minimizar as forças de cisalhamento nas pernas. Cada perna utiliza um conjunto de extensômetros montados para medir forças na direção normal e cargas laterais. Pode transpor obstáculos de 1 m de altura e a postura do corpo do robô é controlada com auxílio de inclinômetros.

O *hardware* de controle de bordo inclui três placas de processadores. O sistema é controlado em tempo real e distribuído entre três processadores que executam uma operação multitarefa. O primeiro processador coleta informações dos sensores e escreve o estado na memória. O segundo processador controla o impulso das oito pernas e *drives* de controle de movimento, gerando perfis de velocidade para produzir e suavizar a locomoção. O terceiro processador executa o controle da marcha, acessa os valores dos sensores e executa as iterações de marcha. Tem ciclos disponíveis para outras funções, incluindo a comunicação externa.



Figura 2.5: DANTE-II explorando o monte Spurr (Alasca) em 1994, medindo gases, temperaturas e monitorando o interior da cratera.

A pesquisa de Santos, *et al.* (2006) apresenta um robô hexápode (*SIL06*) utilizado em tarefas de desminagem e recolhimento de munições não detonadas. A cabeça do robô possui um sistema de sensores capaz de detectar as minas terrestres como mostra a Fig. 2.6.

O foco da pesquisa foi a busca de minas metálicas. A cabeça do robô é capaz de movimentar-se como um braço manipulador para aumentar a área útil de procura, pois o sistema detecta áreas muito pequenas. Após detectar o objeto o robô marca a localização exata em um banco de dados para posteriormente efetuar a análise e desativação. Para configuração do sistema foram considerados: a velocidade do robô, a estabilidade, o peso total e eficiência energética.

O sistema de controle utiliza dois computadores (bordo e operador). O computador de bordo é o responsável pelo controle e coordenação do manipulador, articulações dos membros, detector de minas e as operações da estação de rádio. O posto do operador é encarregado do banco de dados e gerenciamento de alarme. A comunicação entre os computadores é feita por meio de um protocolo TCP / IP, que torna os dois sistemas operacionais compatíveis.

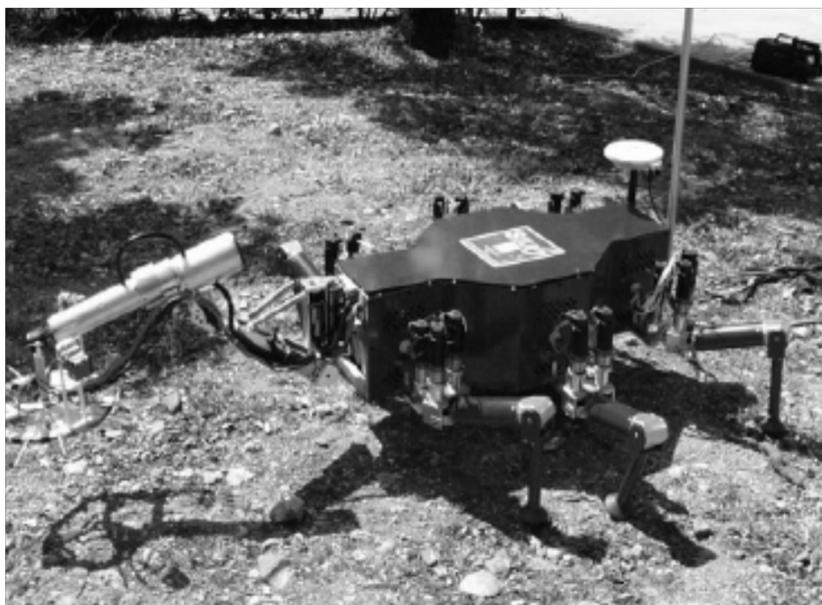


Figura 2.6: Robô *SIL06* desenvolvido para missões de desminagem (Santos *et al.*, 2006).

O ROBOCLIMBER é um robô quadrúpede com a habilidade de escalada, desenvolvido para realizar operações de perfuração no solo de encostas rochosas. Seu objetivo é confirmar se terrenos onde há deslizamentos de terra podem afetar diferentes tipos de infraestruturas, sendo empregado para fazer perfurações com profundidade de até 20 m. Suas pernas foram confeccionadas em um formato cilíndrico e são capazes de suportar 1500 kg com atuadores hidráulicos como mostra a Fig. 2.7.

Montes *et al.* (2006) apresentam uma abordagem confiável para medição de forças nas pernas do ROBOCLIMBER. Para incorporar a capacidade de sensoriamento de forças, foram utilizados transdutores (extensômetros) que medem de forma indireta as forças de contato entre o solo e os pés. Após a calibração e avaliação experimental de desempenho, foi submetido um teste de usabilidade para encontrar e calcular em tempo real o ponto de momento zero para o robô durante a execução de uma marcha dinamicamente balanceada.



Figura 2.7: ROBOCLIMBER se posicionando em uma encosta rochosa para realizar uma operação de perfuração no solo.

Dentre as aplicações em fase de desenvolvimento, existe o robô *BigDog* (Fig. 2.8), financiado pela *Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA)* e desenvolvido pela *Boston Dynamics*. O robô tem quatro pernas acionadas por um sistema hidráulico. O objetivo é a construção de um veículo não tripulado para aplicações militares capaz de servir como robô cargueiro e obter mobilidade em terrenos de difícil acesso, apresentando vantagens superiores aos veículos existentes com rodas. O robô tem 3m de comprimento e 2,5 m de altura e uma massa de aproximadamente 110 kg. Seu computador de bordo é responsável pelo

controle de locomoção e comunicação com o usuário. Possui sensores que medem a altura, aceleração do corpo, força nos atuadores, carga da bateria e visão, fazendo com que o mesmo mantenha-se em equilíbrio em situações dinâmicas. Atinge velocidades de até 6,4 km por hora, sobe inclinações de até 35 graus e transporta até 340 kg de carga. O robô aborda diferentes maneiras de locomoção com agachar, caminhar, trotar e correr. Seu sistema de controle se adapta às mudanças do terreno através da postura.

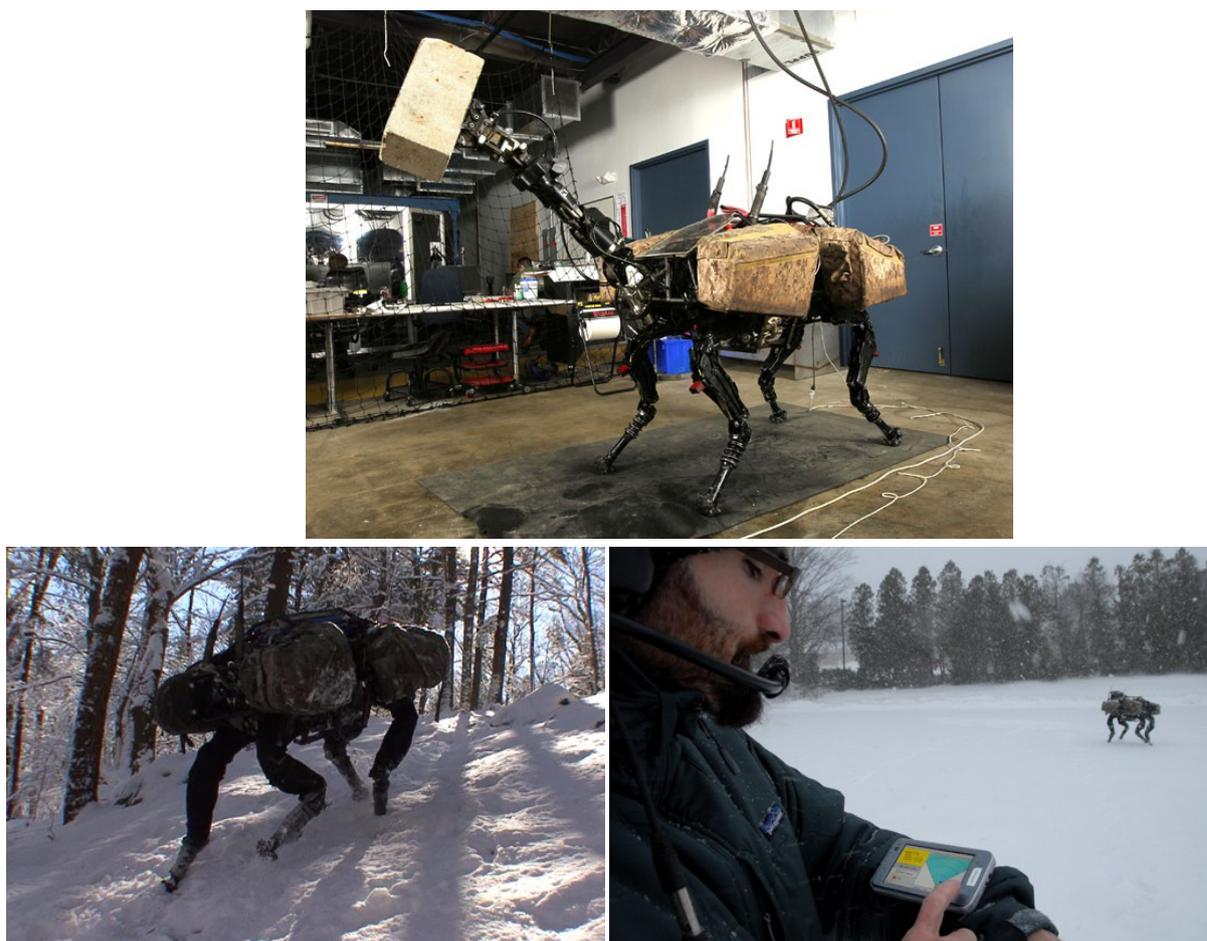


Figura 2.8: Robô BigDog desenvolvido para aplicações militares. (a) Robô com seu manipulador de objetos, (b) BigDog subindo um morro com inclinação de 30 graus, (c) Operador do robô (Raibert *et al.*, 2008).

Com o passar dos anos as pesquisas procuraram abordar capacidades de locomoção que se aproximem dos sistemas biológicos, com diferentes números de pernas e características específicas. Como exemplos de pesquisas estão o *Robot II* e *Robot III*.

O *Robot II* e *Robot III* (Fig.2.9) são robôs hexápodes biologicamente inspirados desenvolvidos por *Case Western Reserve University* (CWRU). O *Robot II* possui 3 graus de liberdade de revolução (3 DOF – *degrees of freedom*) e 1 DOF de translação por perna. Cada DOF ativo é alimentado por um motor DC (*Direct Current*) de 6 W. O sensor de posição de cada articulação é realizado por um potenciômetro rotativo ligado a cada junta. As forças de reação são monitoradas por células de carga montadas nos segmentos da perna (tíbia). A estrutura do corpo é composta por madeira balsa e alumínio.

Seu controle é feito por meio de um PC *off-board*. O controlador de marcha é baseado em mecanismos inspirados para coordenar as pernas de um inseto-pau (*Carausius Marosus*). O robô pode executar uma variedade de padrões de locomoção (onda metacronal e trípede) e o controle de velocidade por meio da variação de um único parâmetro. Possui um sistema de controle de reflexos que permite que o robô encontre um apoio para as pernas em terrenos irregulares ou ausentes (Nelson *et al.*, 1997).

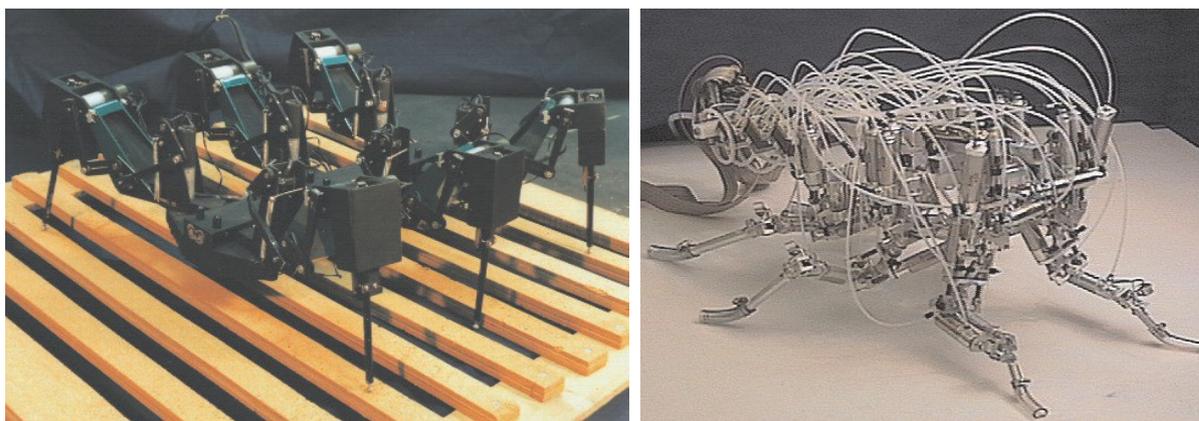


Figura 2.9: Protótipos de robôs biologicamente inspirados desenvolvidos pela Case Western Reserve University (CWRU), Robot II (esquerda) e Robot III (direita).

Por outro lado, o *Robot III* é um hexápode com estudos cinemáticos baseados em uma barata (*Blaberus Discoidalis*), realizados no Laboratório Ritzmann no Departamento de

Biologia em CWRU . O robô tem um total de 24 graus de liberdade com cinco para cada perna dianteira, quatro para as pernas médias e três para as pernas traseiras. O robô é acionado pneumaticamente usando cilindros e válvulas. A modulação de largura de pulso das válvulas é implementada para o controle de posição variável dos cilindros. A estrutura do robô foi fabricada a partir de ligas de alumínio naval. Em cada uma de suas pernas foram adicionados sensores para o monitoramento de forças (Nelson *et al.*, 1997).

Há muitos artigos e livros que apresentam campos de aplicação de robôs móveis com pernas. Foge ao escopo deste trabalho fazer uma revisão completa sobre todas as referências já publicadas. O leitor pode consultar as seguintes referências para elucidar qualquer dúvida, esclarecer qualquer ponto da teoria e analisar novos campos de aplicações:

- Aplicações de exploração de locais remotos no espaço ou em planetas - Bares, *et al.*, (1989) e Kemurdjian, *et al.*, (1995);
- Fundo marinho - Ayers *et al.* (2000).
- Artigos que descrevem aplicações em ambientes hostis ou perigosos como operações de busca e salvamento - Mae, *et al.*, (2000);
- Trabalhos de escavação e construção civil - Hasunuma, *et al.*, (2003).

Capítulo 3 : Descrição do Robô Hexápode Myrmex-I

3.1 Estrutura Mecânica

Myrmex-I é um robô hexápode biologicamente inspirado (inseto) com 18 graus de liberdade que o torna ágil, flexível e permite caminhar em ambientes acidentados e não estruturados. Seu corpo têm aproximadamente 20 cm de comprimento por 10,5 cm de largura no tórax e suas pernas estendidas possuem comprimento máximo de 30,0 cm.

As articulações da perna são alimentadas por servomotores Hitec (HSR 5990-TG). Foram escolhidos servos ao invés de motores DC, cilindros pneumáticos ou outras opções, por causa de sua versatilidade. Servomotores, assim como motores de corrente contínua, podem ser facilmente alimentados por baterias e podem fornecer velocidade adequada para a aplicação. Entretanto utilizando servomotores, o projeto adapta-se facilmente a novos módulos permitindo conectividade simples com o controlador sem a necessidade de construir *drives* de potência para o acionamento. Os servomotores escolhidos são utilizados em aplicações de robótica e têm características específicas, como controle de velocidade e capacidade para impor um limite de torque. Os HSR 5990-TG são capazes de fornecer até 39 kgf.cm de torque e pesam 68 g.

A configuração mecânica do robô possui uma estrutura com massa total de aproximadamente 3,8 kg, incluindo as baterias e os *drives* de controle como mostra a Fig. 3.1. O sistema foi projetado para transpor obstáculos com pouco mais de 100 mm de altura e suas peças personalizadas foram confeccionadas em alumínio naval e erodidas a fio. O projeto do robô passou por vários estágios, dentre eles, a construção de protótipos iniciais para verificar as limitações físicas (espaçamento entre as pernas para evitar colisões e dimensões apropriadas) e configurações diferentes para as pernas.

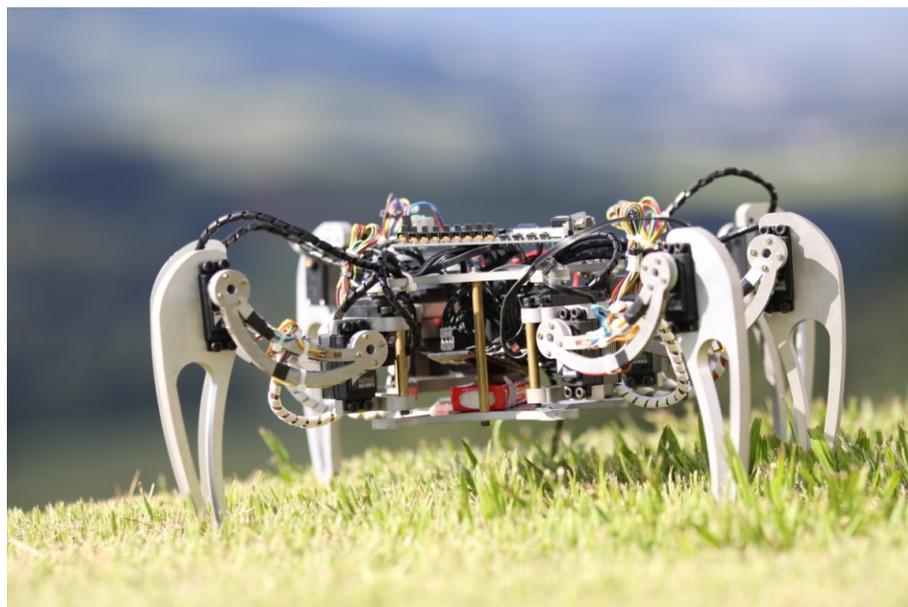


Figura 3.1: Primeira geração do robô biologicamente inspirado Myrmex-I com 18-DOF projetado para locomoção em ambientes não estruturados.

3.1.1 Estrutura das Pernas

O projeto atual utiliza três servomotores em cada perna. Cada servo está equipado com um potenciômetro que atua como sensor de rotação. Porém, não deixa disponível a informação do ângulo para o controlador (FPGA). Devido a esta indisponibilidade de informações, aplica-se uma abordagem de controle discreto para resolução da cinemática que será detalhado na seção 4.

As dimensões das pernas foram escolhidas visando conseguir um amplo espaço de trabalho e permitir uma grande gama de movimentos. O projeto evitou o uso de conjuntos de rolamentos personalizados, o que permite uma estrutura simples para as pernas e torna o projeto altamente modular. Este pode ser facilmente reconfigurado para diferentes fins, facilitando a manutenção e substituição das peças.

As estruturas das pernas possuem um eixo de revolução para cada grau de liberdade, atuando diretamente no membro a ser movimentado: coxa, fêmur e tíbia. As massas dos componentes individuais do robô são apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Massa dos componentes do Robô Hexápode Myrmex

Componente	Valor (Kg)	Quantidade
Bateria Servo	0,312	01
Bateria Controle	0,132	01
Servos – HSR 5990-TG	0,068	18
Base Superior	0,130	01
Base Inferior	0,214	01
Coxa	0,032	12
Fêmur	0,052	06
Tíbia	0,150	06
Placa FPGA	0,060	01
Placa Sensores	0,070	01
Cabos	0,050	-
TOTAL	3788,0	-

3.2 Controle

Até o presente momento, esta pesquisa está utilizando o FPGA XC3S100E da família Spartan3 da Xilinx (Fig. 3.2). Alguns autores (Wang, 2007 e Hartenstein, 1997) adotaram o uso de DSPs (*Digital Signal Processor*) ao invés de FPGAs para este tipo de aplicação. A desvantagem do uso de FPGAs com relação ao uso de DSPs é a dificuldade na implementação de cálculos trigonométricos e a utilização de ponto flutuante.

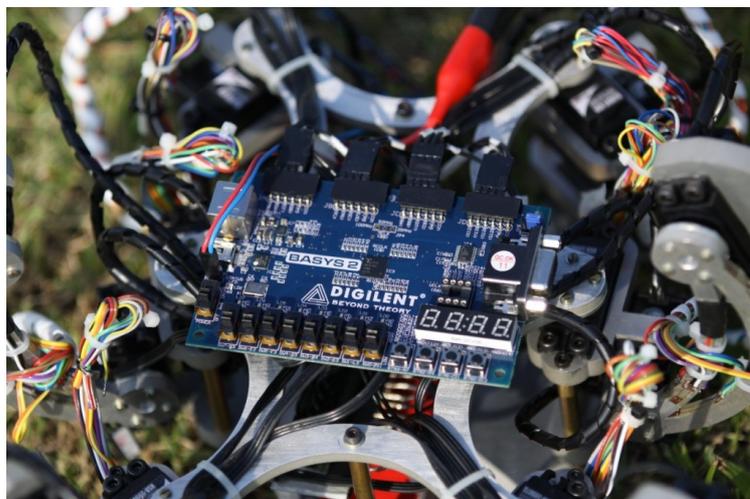


Figura 3.2: Tórax com placa de controle FPGA (Spartan3).

Essa dificuldade foi resolvida utilizando o programa gerador de módulos aritméticos FloPoCo, que abrange operadores aritméticos e trigonométricos comumente encontrados em aplicações robóticas. Por outro lado, este circuito integrado (FPGA) apresenta como vantagens: a possibilidade de configuração para uma aplicação específica e a grande capacidade de processamento em paralelo, permitindo a rápida execução de algoritmos complexos.

A configuração do FPGA é realizada em linguagem VHDL, usando o *software* ISE WebPACK 13.2 da Xilinx. A plataforma pode ser executada com um cristal externo numa frequência de até 100 MHz, possui 64MB de SDRAM e 16 pinos de entrada / saída.

Todo o sistema é alimentado por duas baterias de 2 células (7,4V) de polímero de lítio (LiPo). As baterias têm uma capacidade total de 7600 mAh e duram em média de 90 minutos. Os servos são controlados individualmente em modulação por largura de pulso (PWM – *Pulse Width Modulation*).

3.3 Descrição Física e Modelagem

A cinemática trata do estudo analítico da geometria do movimento em relação a um referencial. Essa modelagem matemática é uma ferramenta essencial para descrever a posição e orientação relativa do robô no espaço cartesiano, sem considerar as forças e momentos que causam variações da posição. A cinemática pode ser definida de duas formas distintas:

- Cinemática direta que visa determinar a posição e orientação do ponto de apoio da perna em relação a um referencial, conhecendo a posição angular de cada articulação.
- Cinemática inversa que consiste em determinar as posições angulares de cada eixo da articulação, de forma que leve o ponto de apoio a uma posição definida.

Na modelagem cinemática direta de robôs móveis que apresentam pernas, formadas por mecanismos seriados, utiliza-se a sobreposição de efeitos para cálculos dos movimentos. Aplicam-se, geralmente, métodos já conhecidos e bem sedimentados, como Denavit-Hartenberg que apresenta solução única e torna-se menos complexo evitar pontos de singularidades. Entretanto, o modelo cinemático inverso apresenta, matematicamente, uma maior complexidade por possuir múltiplas soluções.

3.3.1 Modelagem Cinemática Direta

A cinemática direta trata da determinação de um conjunto de variáveis cartesianas, que lida com o conjunto de variáveis de junta. Para obter uma descrição do movimento é preciso saber a descrição da posição e orientação dos segmentos do robô. Para isso, atrela-se um sistema de coordenadas a cada ligamento do robô, de maneira que o problema de descrever a posição e orientação relativa dos segmentos se transforma no problema de descrever a posição relativa dos sistemas de coordenadas (Bachega e Campo 2010).

As pernas de um robô hexápode consistem basicamente de uma série de corpos rígidos unidos entre si por articulações de revolução. A análise cinemática direta de cada mecanismo da perna foi formulada para obter a posição e orientação do ponto de apoio da i -ésima perna ($O_{T_i} - x_{T_i} y_{T_i} z_{T_i}$) em relação ao sistema base do robô ($O - xyz$). A cinemática direta foi resolvida adotando a notação de Denavit-Hartenberg (Craig, 1989), que associa quatro parâmetros ($a_i, \alpha_i, d_i, \theta_i$) para a matriz de transformação ${}^{i-1}_i T$ e descreve a posição e orientação entre dois sistemas de coordenadas baseados em transformações homogêneas. Nos quatro parâmetros associados tem-se:

- a_i : representa a distância (em módulo) entre os eixos z_{i-1} e z_i , medida ao longo de x_i , que é a normal comum entre z_{i-1} e z_i ;
- α_i : é o ângulo (positivo ou negativo) entre o eixo z_{i-1} e z_i , medido em torno de x_i segundo a regra da mão direita;
- d_i : representa o deslocamento (positivo ou negativo) entre os eixos x_{i-1} e x_i , medida ao longo de z_{i-1} ;
- θ_i : é o ângulo (positivo ou negativo) entre os eixos x_{i-1} e x_i , medido em torno de z_{i-1} segundo a regra da mão direita.

A Fig. 3.3 representa um par de segmentos adjacentes (segmento i e $i - 1$) e suas respectivas articulações. A posição e orientação relativa entre esses dois segmentos é descrita pelas transformações de translação e de rotação entre os dois sistemas de coordenadas fixos a estes segmentos.

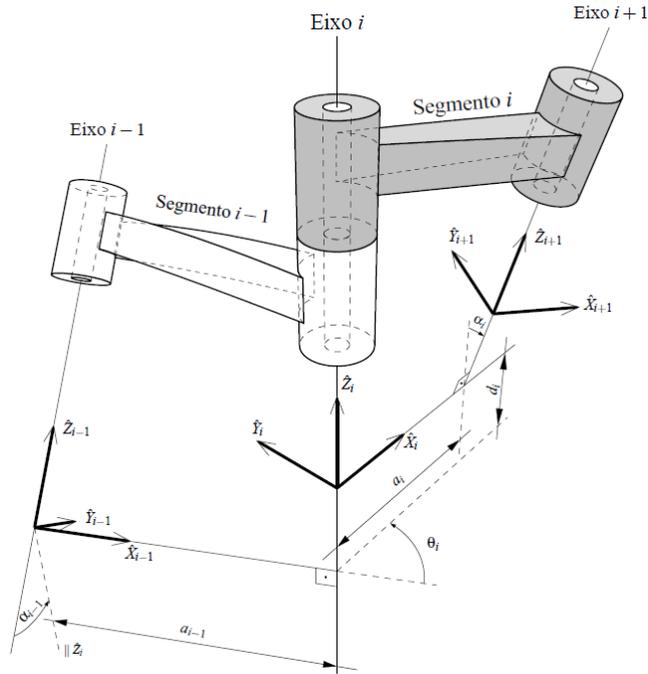


Figura 3.3: Parâmetros da notação de Denavit-Hartenberg (Laus, 2005).

Utilizando estes quatro parâmetros, a posição e orientação do sistema de coordenadas i em relação ao sistema $i-1$ pode ser definida como uma sequência de quatro transformações resultando na seguinte matriz de transformação homogênea (Bachega e Campo, 2010):

$$\begin{aligned}
 {}^{i-1}_i T &= RotZ_{(\theta_i)} Transl_{(0, 0, d_i)} Transl_{(a_i, 0, 0)} RotX_{(\alpha_i)} \\
 &= \begin{bmatrix} c_{\theta_i} & -s_{\theta_i}c_{\alpha_i} & s_{\theta_i}s_{\alpha_i} & a_i c_{\theta_i} \\ s_{\theta_i} & c_{\theta_i}c_{\alpha_i} & -c_{\theta_i}s_{\alpha_i} & a_i s_{\theta_i} \\ 0 & s_{\alpha_i} & c_{\alpha_i} & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)
 \end{aligned}$$

O primeiro passo para definir os sistemas de coordenadas a cada ligamento do robô, é localizar os eixos z_i ao longo dos eixos das articulações, de forma que o eixo z_{i-1} é o eixo da articulação i . O eixo x_i é direcionado ao longo da extensão da normal comum, na direção de z_{i-1} para z_i . Finalmente, o eixo y_i é escolhido de forma que o resultante $O_i-x_iy_iz_i$ seja um sistema de coordenadas que segue a regra da mão direita (Fig. 3.4).

Dessa forma pode-se definir o seguinte algoritmo para realizar a cinemática direta de posição do robô hexápode (Craig, 1989):

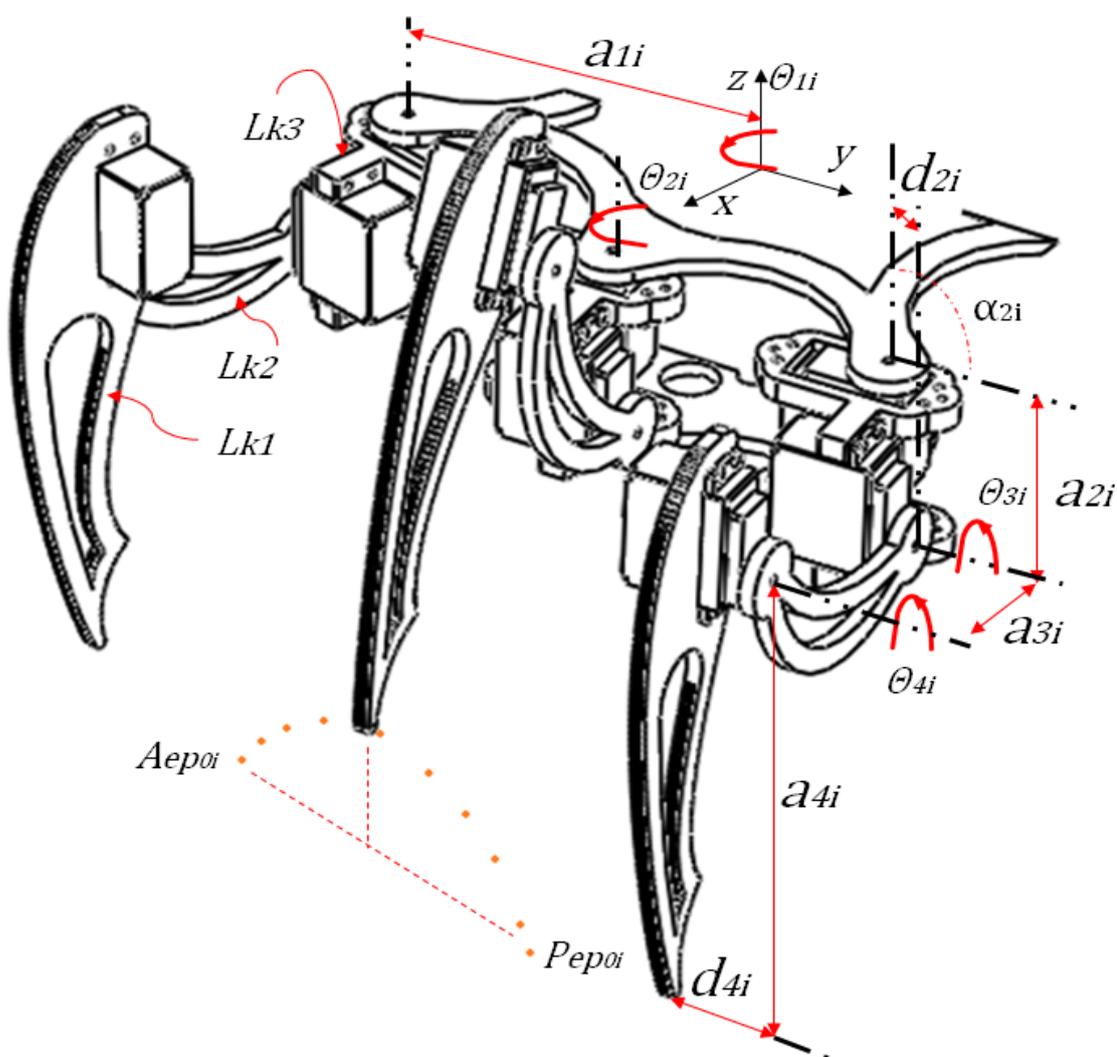


Figura 3.4: Parâmetros cinemáticos do robô Myrmex-I. Vista 3D em corte para representação dos ligamentos e geometria das pernas com 3-DOF. Variáveis de juntas a serem determinadas pelo modelo cinemático inverso para trajetória do ponto de apoio da perna proposta.

1. Localizar os eixos das articulações, ou seja, os eixos z_0, z_1, \dots, z_{n-1} .
2. Estabelecer o sistema de coordenadas da base. A origem deste sistema pode ser escolhida em qualquer lugar do eixo z_0 . Os eixos x_0 e y_0 podem ser escolhidos arbitrariamente, desde que satisfaçam a regra da mão direita.

Repetir os passos 3 a 5 para $i = 1, \dots, n - 1$.

3. Localizar a origem do sistema i , ponto O_i , onde a normal comum entre os eixos z_i e z_{i-1} intercepta o eixo z_i . Se o eixo z_i intercepta o eixo z_{i-1} , localizar o ponto na interseção. Se os eixos z_i e z_{i-1} são paralelos, localizar o ponto O_i na articulação i .
4. Estabelecer o eixo x_i ao longo da normal comum entre os eixos z_i e z_{i-1} , a partir do ponto O_i . O sentido do eixo x_i é na direção do eixo z_{i-1} para o eixo z_i . Se os eixos z_i e z_{i-1} se cruzam, então o eixo x_i é normal a ambos com qualquer direção.
5. Tendo os eixos z_i e x_i , estabelecer o eixo y_i segundo a regra da mão direita.
6. Estabelecer o sistema de coordenada do ponto de apoio da perna, sistema $O_n - x_n y_n z_n$.
7. Criar uma tabela com os parâmetros de Denavit-Hartenberg referentes a cada um dos ligamentos ou articulações.
8. Montar as matrizes de transformação homogênea, ${}^{i-1}_i T(q_i)$, a partir dos parâmetros de Denavit-Hartenberg e da equação (3.1).
9. Obter a matriz de transformação homogênea $M_{4i}^{oT}(q_i, \dots, q_n)$, a partir da equação (3.1), que relaciona a posição do ponto de apoio da i -ésima perna em relação ao sistema base.

O deslocamento das articulações é dado por d_i , se a articulação da perna for prismática, e θ_i se a articulação for de revolução. Como o robô não possui articulações prismáticas, a posição e orientação do ponto de apoio das pernas são descritas em função de $\theta_{1i}, \theta_{2i}, \theta_{3i}, \theta_{4i}$, através da matriz global $M_{4i}^{oT}(q_i)$, dada por:

$$M_{4i}^{oT} = (\theta_{1i}, \theta_{2i}, \theta_{3i}, \theta_{4i}) = {}_1^0T(\theta_{1i}) {}_2^1T(\theta_{2i}) {}_3^2T(\theta_{3i}) {}_4^3T(\theta_{4i})$$

$$= \begin{bmatrix} r_{11i} & r_{12i} & r_{13i} & p_{xi} \\ r_{21i} & r_{22i} & r_{23i} & p_{yi} \\ r_{31i} & r_{32i} & r_{33i} & p_{zi} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} c_{12i}c_{34i} & -c_{12i}s_{34i} & s_{12i} & a_{4i}c_{12i}c_{34i} + a_{3i}c_{3i}c_{12i} + a_{2i}c_{12i} + a_{1i}c_{1i} + d_{4i}s_{12i} \\ s_{12i}c_{34i} & -s_{12i}s_{34i} & -c_{12i} & a_{4i}s_{12i}c_{34i} + a_{3i}s_{12i}c_{3i} + a_{2i}s_{12i} + a_{1i}s_{1i} - d_{4i}c_{12i} \\ s_{34i} & c_{34i} & 0 & a_{4i}s_{34i} + a_{3i}s_{3i} + d_{2i} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Onde por simplificação temos: $c_{12i} = \cos(\theta_{1i} + \theta_{2i})$, $c_{34i} = \cos(\theta_{3i} + \theta_{4i})$, $s_{12i} = \sin(\theta_{1i} + \theta_{2i})$, $s_{34i} = \sin(\theta_{3i} + \theta_{4i})$, $s_{1i} = \sin(\theta_{1i})$, $s_{3i} = \sin(\theta_{3i})$, $c_{1i} = \cos(\theta_{1i})$, $c_{3i} = \cos(\theta_{3i})$, a_{ki} e d_{ki} são parâmetros cinemáticos da estrutura mecânica do robô apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Parâmetros cinemáticos (notação de Denavit-Hartenberg) do Robô Hexápode.

Segmento	a_i	α_i	d_i	θ_i
1	112,7	0	0	θ_{1i}
2	24,9	90	-46,5	θ_{2i}
3	104,2	0	0	θ_{3i}
4	152,7	0	-18,5	θ_{4i}

Observa-se que os elementos r_{mn} formam a matriz de rotação da transformação do sistema base para o sistema do ponto de apoio da perna. A posição da mesma é representada pelos elementos p_{xi} , p_{yi} e p_{zi} , e apenas o ângulo θ_{1i} , não é um parâmetro variável, apresentando um valor fixo para cada uma das pernas.

3.3.2 Modelagem Cinemática Inversa

A finalidade da cinemática inversa é obter as equações das variáveis de juntas da perna do robô em função das posições e orientações almejadas, e obter um algoritmo para calcular estas variáveis de forma eficiente (reduzindo os esforços de processamento), respeitando seus limites mecânicos (Bachega e Campo, 2010).

A coordenação das seis pernas do robô normalmente é realizada usando uma margem de estabilidade adequada entre a projeção do centro de gravidade do robô e do polígono formado entre os pés de apoio durante o movimento de caminhada (Fig. 3.5). No acionamento dos motores, verificou-se que a coordenação das pernas do robô pode ser feita de maneira independente e o objetivo é assegurar a estabilidade adequada durante a caminhada.

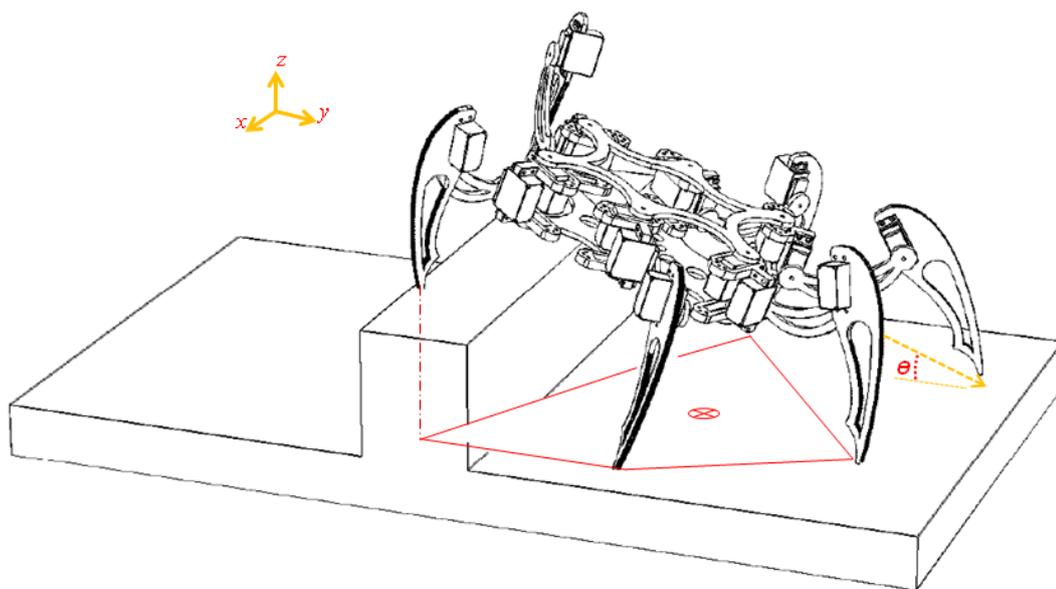


Figura 3.5: Polígono de suporte entre os pontos de apoio das pernas em contato com o solo.

Durante a locomoção, robôs com pernas descrevem sequências contínuas e descontínuas dos movimentos das pernas, alternando entre a fase de transferência e fase de suporte. A fase de transferência é a fração de tempo do ciclo de locomoção (sequência de movimentos das pernas e corpo que se repetem periodicamente), decorridos desde o levantamento de uma perna até o seu apoio, ou seja, o período de tempo em que o ponto de apoio da perna do robô não se encontra em contato com o solo e desloca-se até o local do próximo apoio. A fase de suporte é a fração do tempo de ciclo de locomoção, decorridos desde o apoio da perna do robô até o seu levantamento, ou seja, o período de tempo no qual o ponto de apoio da perna do robô se encontra em contato com o solo, suportando o corpo e empurrando-o para frente (Bachega *et al.*, 2012).

Para descrever uma sequência de locomoção para as pernas, foi necessário definir a trajetória do ponto de apoio da perna do robô. O cálculo da trajetória entre a posição atual e a posição final gera referências intermediárias em determinados instantes no tempo, de modo que a perna possa se movimentar suavemente até o seu objetivo, evitando esforços excessivos nos atuadores. Assim, o movimento do ponto de apoio de cada perna pode ser expresso como uma função, por onde se obtém a posição do ponto de apoio da perna ao longo da trajetória durante a fase de transferência e são realizados dentro do intervalo $[PEP_{oi}, AEP_{oi}]$.

Sendo: PEP_{oi} a posição extremo posterior; e AEP_{oi} a posição extremo anterior do ponto de apoio da i -ésima perna, que são dadas pela trajetória apresentada na Fig. 3.4.

Os pontos gerados na trajetória podem ser transformados em coordenadas articulares q_i quando o modelo cinemático inverso é calculado.

Dada a semelhança com insetos, robôs hexápodes possuem um grupo de membros com graus de liberdade redundantes. Isto é especialmente verificado quando desejamos movimentos semelhantes aos sistemas biológicos. Os insetos são capazes de se moverem de maneira espontânea e não-estereotipados. Por isso, torna-se difícil fornecer trajetórias ao espaço das articulações em tempo real, quando muitos membros são simultaneamente envolvidos (Silva *et al.*, 2005).

Durante a primeira fase do projeto, Myrmex-I caminhava (Fig. 3.6) utilizando principalmente a marcha trípole, uma vez que proporciona uma melhor estabilidade e maior velocidade em superfícies planas. O programa foi desenvolvido em linguagem C para o

microcontrolador (18F4550) do fabricante Microchip®, sendo que, a magnitude, velocidade e a direção de cada passo podiam ser variadas.

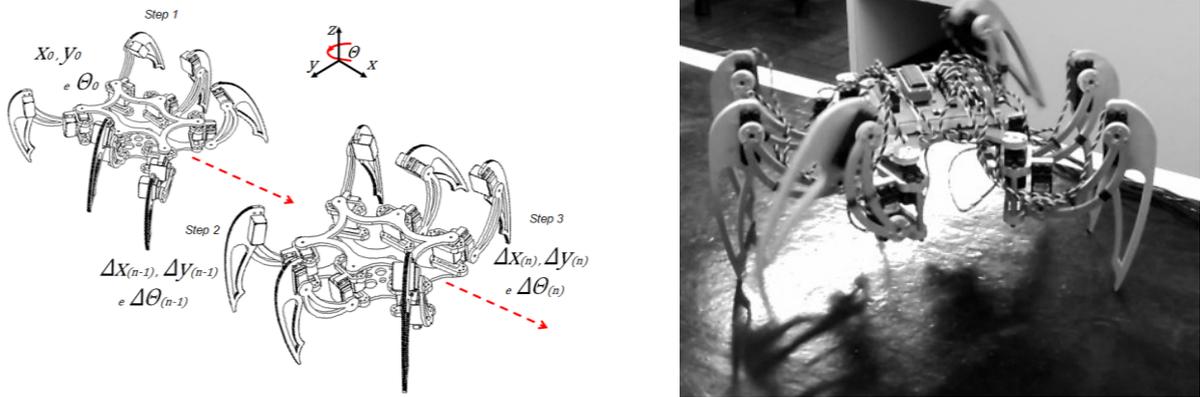


Figura 3.6: Myrmex-I caminhando sobre superfície regular (deslocamento do robô em malha aberta).

O *hardware* então utilizado, no entanto, não permitiu a evolução desejada no sentido de uma implementação da cinemática inversa, uma vez que exigiria operações matemáticas e um limite mais amplo de velocidade nos cálculos que superam sua capacidade. Por isso, adotou-se o uso do FPGA como controlador.

3.3.2.1 Matriz Jacobiano

Para obter-se a velocidade linear do ponto de apoio da i -ésima perna, basta derivar o vetor posição \mathbf{x}_i (função das posições de todas as articulações $\mathbf{x}_i = f(\mathbf{q}_i)$) de cada uma das pernas do robô em relação ao sistema base. Sendo definida a matriz de derivadas parciais (matriz jacobiano $\mathbf{J}(\mathbf{q}_i)$) como:

$$[\mathbf{J}(\mathbf{q}_i)] = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_i}{\partial q_{2i}} & \frac{\partial x_i}{\partial q_{3i}} & \frac{\partial x_i}{\partial q_{4i}} \\ \frac{\partial y_i}{\partial q_{2i}} & \frac{\partial y_i}{\partial q_{3i}} & \frac{\partial y_i}{\partial q_{4i}} \\ \frac{\partial z_i}{\partial q_{2i}} & \frac{\partial z_i}{\partial q_{3i}} & \frac{\partial z_i}{\partial q_{4i}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j_{11i} & j_{12i} & j_{13i} \\ j_{21i} & j_{22i} & j_{23i} \\ j_{31i} & j_{32i} & j_{33i} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$\dot{j}_{11i} = -a_{4i}s_{12i}c_{34i} - a_{3i}c_{3i}s_{12i} - a_{2i}s_{12i} + d_{4i}c_{12i}$$

$$\dot{j}_{12i} = -a_{4i}c_{12i}s_{34i} - a_{3i}s_{3i}c_{12i}$$

$$\dot{j}_{13i} = -a_{4i}s_{12i}c_{34i} - a_{3i}c_{3i}s_{12i} - a_{2i}s_{12i} + d_{4i}c_{12i}$$

$$\dot{j}_{21i} = a_{4i}c_{12i}c_{34i} + a_{3i}c_{3i}c_{12i} + a_{2i}c_{12i} + d_{4i}s_{12i}$$

$$\dot{j}_{22i} = -a_{4i}s_{12i}s_{34i} - a_{3i}s_{3i}s_{12i}$$

$$\dot{j}_{23i} = -a_{4i}s_{12i}s_{34i}$$

$$\dot{j}_{31i} = 0$$

$$\dot{j}_{32i} = a_{4i}c_{34i} + a_{3i}c_{3i}$$

$$\dot{j}_{33i} = a_{4i}c_{34i}$$

Em essência, cada deslocamento angular \dot{q}_{in} da i -ésima perna pode ser computado usando a seguinte equação:

$$\dot{q}_{in} = J(q_{in-1})^{-1} \cdot [\Delta f(q_n)] \quad (3.4)$$

$$q_{i(n+1)}^* = f(q_n) + \dot{q}_{in} \quad (3.5)$$

Onde: $J(q_{in-1})^{-1}$ representa a matriz jacobiano inversa, e $[\Delta f(q_n)]$ representa o erro entre a posição atual e a próxima desejada.

O cálculo da cinemática inversa é realizado no início de uma etapa em que o robô assume uma configuração conhecida (*home*), o qual serve como entrada de valor inicial para as equações da cinemática inversa. O algoritmo executa as iterações para o cálculo de cada deslocamento angular (\dot{q}_{in}) e, em seguida, finaliza, quando a diferença entre o valor calculado e as posições desejadas está abaixo de um pequeno número (δ).

As vantagens da utilização deste método incluem a natureza única da solução e a sua modularidade, uma vez que os ângulos de articulações de uma perna não dependem das outras. A Fig. 3.7 apresenta o algoritmo para obter a cinemática inversa do robô.

A matriz Jacobiano $J(\mathbf{q}_i)$ define uma relação linear entre o vetor das velocidades das articulações e o vetor das velocidades do ponto de apoio da i -ésima perna do robô dado pela equação 3.1.

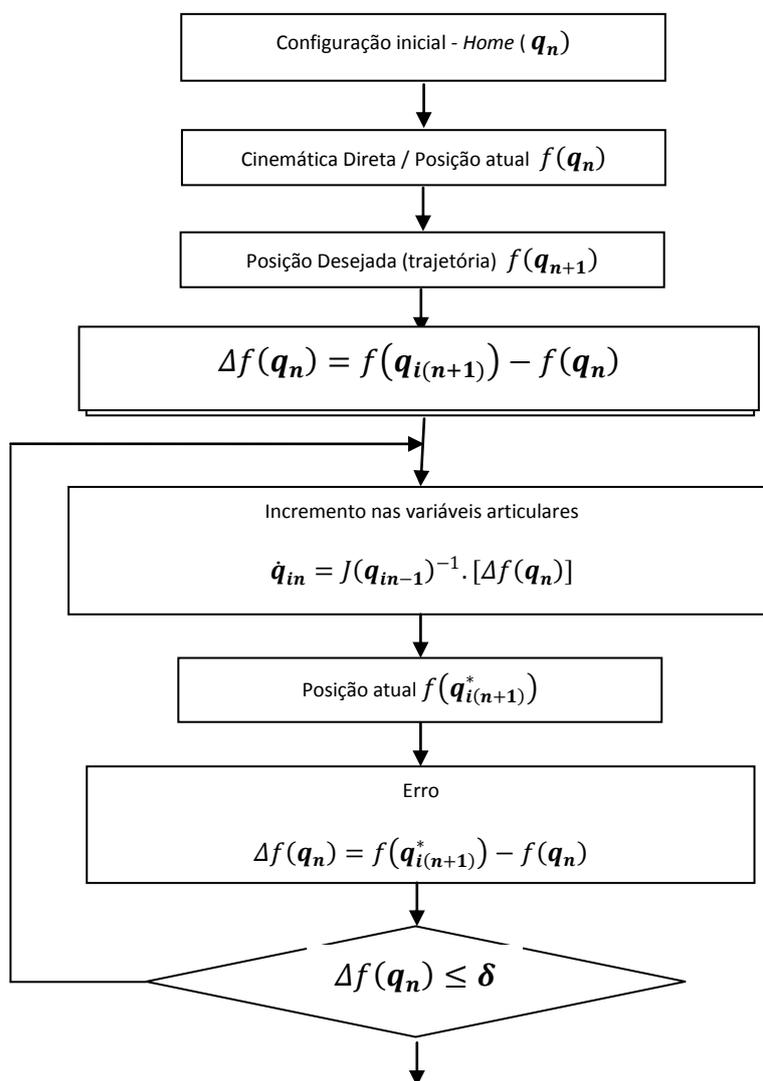


Figura 3.7: Algoritmo aplicado para resolver o problema da cinemática inversa do Robô Hexápode.

Tendo em conta que o Jacobiano é função de (\mathbf{q}_i) , existem configurações particulares nas quais a perna do robô perde um ou mais graus de liberdade, sendo conhecidas como configurações singulares. Isso ocorre quando não é possível resolver a matriz jacobiano inversa (determinante nulo). Quando o determinante da matriz jacobiano é zero, o sistema de equações que transforma as forças aplicadas no robô em forças aplicadas nas articulações não pode ser resolvido (Kannap e Cobet, 2000).

Kannap e Cobet (2000) afirmam que a identificação de configurações singulares é importante por diversas razões:

1. As singularidades representam configurações em que a mobilidade do manipulador é reduzida (impossível impor um movimento arbitrário para o efetuador);
2. Pequenas velocidades do órgão terminal podem corresponder a grandes velocidades das articulações;
3. Nas singularidades, pequenas forças e torques do órgão terminal podem corresponder a grandes forças e torques das articulações;
4. As singularidades usualmente correspondem a pontos do contorno do volume de trabalho do manipulador, isto é, pontos de máximo alcance do manipulador;
5. As singularidades correspondem a pontos do volume de trabalho do manipulador que podem ser inatingíveis em pequenas mudanças dos parâmetros do membro;
6. Nas proximidades das singularidades não existe uma única solução para o problema da cinemática inversa.

Para investigar as singularidades das pernas do robô, foi necessário identificar condições em que o determinante da matriz $\mathbf{J}(\mathbf{q}_i)$ seja nulo. Nos mecanismos seriados, geralmente é simples evitar esses pontos de singularidades. Como exemplo, uma observação poderia ser feita quando a segunda e terceira colunas da eq. 3.3 tornam-se linearmente independentes, ou seja, quando o segmento LK3 (tíbia) está totalmente distendido ou

totalmente retraído ($\theta_{4i} = 0$ ou $\theta_{4i} = \pi$). Nesse caso, o controlador fornece a coordenada de ângulo sempre dentro do volume de trabalho da perna do robô, respeitando seus limites físicos.

Para o robô, as condições de singularidades bem como a validação do modelo matemático proposto foram restringidas por *software*. Os programas foram desenvolvidos e simulados no MATLAB® 2011.

Capítulo 4 : Implementação, em FPGA, do Módulo da Cinemática Inversa.

4.1 Gerador de Módulos Aritméticos – FloPoCo

O FloPoCo (Detrey e Dinechin, 2007) é um programa gerador de módulos aritméticos que tem recursos para a geração parametrizável de módulos trigonométricos em ponto fixo, que calculam suas saídas por meio de interpolação polinomial. Na documentação do programa, informa-se que estes módulos só funcionam para funções monotônicas. Por isto, não foi possível a geração de módulo que calculasse o cosseno para a faixa de ângulos de $[-\pi/2$ a $\pi/2]$.

Para a função seno, não deveria se aplicar esta restrição. Mas, verificou-se, na prática, que o módulo para cálculo de seno gerado pelo FloPoCo para a mesma faixa de ângulos de entrada não funcionou. Só se obtiveram, então, módulos para seno e cosseno funcionando corretamente para a faixa de ângulos de $[0$ a $\pi/2]$. Estes módulos são gerados, pelo FloPoCo, usando-se os comandos do tipo:

flopoco HOTBMRRange func wI wO degree xmin xmax scale

Em que:

1. **HOTBMRRange** é um dos geradores de operadores genéricos do FloPoCo, para avaliação de funções arbitrárias em ponto fixo;
2. **func** é a função cujo valor se deseja avaliar;
3. **wI** é o número de bits de entrada;
4. **wO** é o número de bits de saída;
5. **degree** é o grau do polinômio interpolador;

- 6. **xmin, xmax** são os valores extremos aceitáveis à entrada;
- 7. **scale** é um fator de escala aplicável à saída.

Neste projeto, os módulos trigonométricos foram gerados usando-se:

flopoco HOTBMRRange "cos(x)" 10 10 3 0 1.57 1

flopoco HOTBMRRange "sin(x)" 10 10 3 0 1.57 1

Eles foram chamados, respectivamente, de “**hotbm_cos_x10_10_3_0_1_57_1**” e “**hotbm_sin_x10_10_3_0_1_57_1**”.

O problema de faixa de valores de entrada para módulos que funcionassem para ângulos entre $[-\pi/2$ a $\pi/2]$ foi resolvido da seguinte maneira:

Os ângulos estão codificados em binário, usando 11 bits, segundo a tabela 4.1 (Usa-se interpolação linear entre os valores extremos da tabela). Desta forma, à entrada, tanto o valor “0111111111” quanto o valor “1000000000” farão a saída valer “0000000000”. Haverá, portanto, dois zeros, conforme a tabela 4.1.

Tabela 4.1: Codificação com 12 bits, para os ângulos de entrada dos blocos.

<i>Entrada(rad)</i>	<i>Ângulo</i>
1111111111	$\pi/2$
...	...
1000000000	0
0111111111	0
...	...
0000000000	$-\pi/2$

Para o cálculo do cosseno, a solução para este problema consiste em se explorar o fato de que $\cos(\beta) = \cos(-\beta)$. Assim, caso o ângulo recebido for negativo, basta inverter o seu sinal e calcular o valor do cosseno do ângulo resultante. O nome do módulo usado para se fazer este ajuste é “**ajusta_entrada**”. Sua especificação é:

- Sua entrada terá 11 bits e sua saída 10 bits;
- O bit mais significativo da entrada não irá para a saída;
- Se entrada \geq “10000000000”, basta copiarem-se para a saída os 10 bits menos significativos da entrada;
- Se entrada $<$ “10000000000”, basta invertem-se os 10 bits menos significativos da entrada e enviar estes bits para a saída;

A saída do módulo **ajusta_entrada** deverá ser fornecida ao módulo que calcula o cosseno (**hotbm_cos_x10_10_3_0_1_57_1**).

Para solução do módulo seno, usou-se a mesma codificação de entrada para o cosseno, o mesmo módulo **ajusta_entrada** e o módulo seno **hotbm_sin_x10_10_3_0_1_57_1**. Porém, se o ângulo de entrada for negativo, deve-se trocar o sinal do resultado do seno.

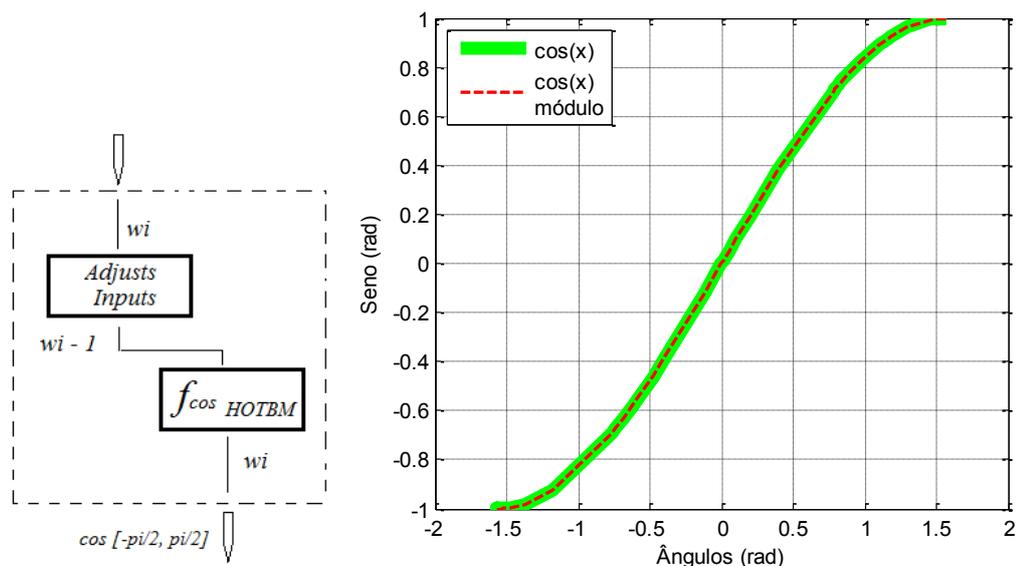
As tabelas 4.2 e 4.3 apresentam os valores de entrada que foram simulados usando o *software* ISE WebPACK 13.2 da Xilinx, bem como, a saída de cada um dos módulos. A Fig. 4.1 apresenta os resultados da simulação dos módulos seno e cosseno.

Tabela 4.2: Valores de entrada para o módulo cosseno.

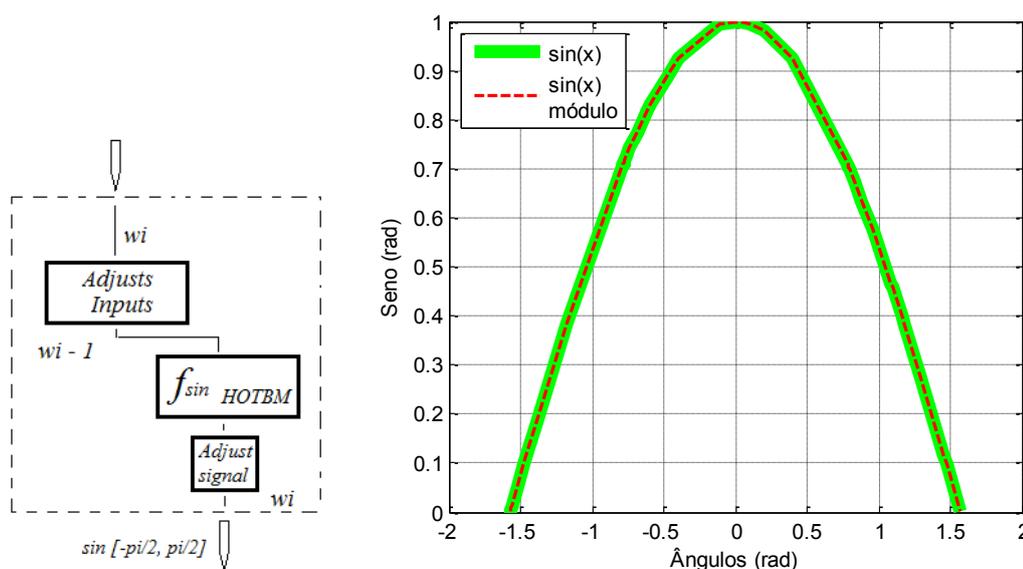
Entrada (rad)	Simulação no ISE WebPACK 13.2		
	Saída (rad)	Saída do bloco (rad)	Erro (rad)
-1,570796	0,000000	0,001953125	1,95E-03
-1,570796	0,000000	0,00390625	3,91E-03
-1,570796	0,000000	0,005859375	5,86E-03
-1,564660	0,006136	0,008789063	2,65E-03
-1,558524	0,012272	0,014648438	2,38E-03
-1,546253	0,024541	0,02734375	2,80E-03
-1,521709	0,049068	0,051757813	2,69E-03
-1,472622	0,098017	0,100585938	2,57E-03
-1,374447	0,195090	0,197265625	2,18E-03
-1,178097	0,382683	0,384765625	2,08E-03
-0,785398	0,707107	0,708984375	1,88E-03
-0,783864	0,708191	0,709960938	1,77E-03
-0,782330	0,709273	0,7109375	1,66E-03
-0,779262	0,711432	0,712890625	1,46E-03
-0,780796	0,710353	0,711914063	1,56E-03
-0,773126	0,715731	0,716796875	1,07E-03
-0,760854	0,724247	0,725585938	1,34E-03
-0,736311	0,740951	0,7421875	1,24E-03
-0,687223	0,773010	0,774414063	1,40E-03
-0,613592	0,817585	0,818359375	7,75E-04
-0,589049	0,831470	0,833007813	1,54E-03
-0,480136	0,886932	0,887695313	7,63E-04
-0,392699	0,923880	0,924804688	9,25E-04
-0,113515	0,993564	0,994140625	5,76E-04
-0,098175	0,995185	0,99609375	9,09E-04
-0,001534	0,999999	1	1,18E-06
0,000000	1,000000	1	0,00E+00
0,001534	0,999999	1	1,18E-06
0,003068	0,999995	1	4,71E-06
0,006136	0,999981	1	1,88E-05
0,012272	0,999925	1	7,53E-05
0,024544	0,999699	1	3,01E-04
0,049087	0,998795	0,999023438	2,28E-04
0,098175	0,995185	0,995117188	-6,75E-05
0,196350	0,980785	0,981445313	6,60E-04
0,392699	0,923880	0,923828125	-5,14E-05
0,785398	0,707107	0,708007813	9,01E-04
0,786932	0,706021	0,706054688	3,34E-05
0,788466	0,704934	0,705078125	1,44E-04
0,790000	0,703845	0,704101563	2,56E-04
0,791534	0,702755	0,703125	3,70E-04
0,797670	0,698376	0,698242188	-1,34E-04
0,809942	0,689541	0,689453125	-8,74E-05
0,834486	0,671559	0,671875	3,16E-04
0,883573	0,634393	0,634765625	3,72E-04
0,957204	0,575808	0,576171875	3,64E-04
0,981748	0,555570	0,555664063	9,38E-05
1,090660	0,461900	0,461914063	1,43E-05
1,093728	0,459177	0,459960938	7,84E-04
1,162757	0,396810	0,397460938	6,51E-04
1,178097	0,382683	0,383789063	1,11E-03
1,294680	0,272621	0,2734375	8,16E-04
1,457282	0,113271	0,114257813	9,87E-04
1,472622	0,098017	0,098632813	6,16E-04
1,569262	0,001534	0,001953125	4,19E-04

Tabela 4.3: Valores de entrada para o módulo seno.

Entrada (rad)	Simulação no ISE WebPACK 13.2		
	Saída (rad)	Saída do bloco (rad)	Erro (rad)
-1,570796	-1	-1	0
-1,570796	-1	-1	0
-1,570796	-1	-1	0
-1,564660	-0,99998118	-1	1,882E-05
-1,558524	-0,9999247	-1	7,53E-05
-1,546253	-0,99969882	-1	0,0003012
-1,521709	-0,99879546	-0,999023438	0,000228
-1,472622	-0,99518473	-0,995117188	-6,754E-05
-1,374447	-0,98078528	-0,98046875	-0,0003165
-1,178097	-0,92387953	-0,922851563	-0,001028
-0,785398	-0,70710678	-0,706054688	-0,0010521
-0,783864	-0,70602126	-0,705078125	-0,0009431
-0,782330	-0,70493408	-0,704101563	-0,0008325
-0,779262	-0,70275474	-0,701171875	-0,0015829
-0,780796	-0,70384524	-0,702148438	-0,0016968
-0,773126	-0,69837625	-0,697265625	-0,0011106
-0,760854	-0,68954054	-0,688476563	-0,001064
-0,736311	-0,67155895	-0,669921875	-0,0016371
-0,687223	-0,63439328	-0,6328125	-0,0015808
-0,613592	-0,57580819	-0,57421875	-0,0015894
-0,589049	-0,55557023	-0,553710938	-0,0018593
-0,480136	-0,46189979	-0,459960938	-0,0019389
-0,392699	-0,38268343	-0,380859375	-0,0018241
-0,113515	-0,11327095	-0,111328125	-0,0019428
-0,098175	-0,09801714	-0,096679688	-0,0013375
-0,001534	-0,00153398	0	-0,001534
0,000000	5,55112E-15	0	5,551E-15
0,001534	0,00153398	0,001953125	-0,0004191
0,003068	0,003067957	0,002929688	0,0001383
0,006136	0,006135885	0,005859375	0,0002765
0,012272	0,012271538	0,012695313	-0,0004238
0,024544	0,024541229	0,024414063	0,0001272
0,049087	0,049067674	0,048828125	0,0002395
0,098175	0,09801714	0,09765625	0,0003609
0,196350	0,195090322	0,1953125	-0,0002222
0,392699	0,382683432	0,3828125	-0,0001291
0,785398	0,707106781	0,70703125	7,553E-05
0,786932	0,708190637	0,708007813	0,0001828
0,788466	0,709272826	0,708984375	0,0002885
0,790000	0,710353347	0,709960938	0,0003924
0,791534	0,711432196	0,7109375	0,0004947
0,797670	0,715730825	0,715820313	-8,949E-05
0,809942	0,724247083	0,724609375	-0,0003623
0,834486	0,740951125	0,740234375	0,0007168
0,883573	0,773010453	0,772460938	0,0005495
0,957204	0,817584813	0,817382813	0,000202
0,981748	0,831469612	0,831054688	0,0004149
1,090660	0,886932119	0,88671875	0,0002134
1,093728	0,888345033	0,888671875	-0,0003268
1,162757	0,917900776	0,91796875	-6,797E-05
1,178097	0,923879533	0,923828125	5,141E-05
1,294680	0,962121404	0,961914063	0,0002073
1,457282	0,993564136	0,993164063	0,0004001
1,472622	0,995184727	0,995117188	6,754E-05
1,569262	0,999998823	1	-1,177E-06



(a)



(b)

Figura 4.1: Resultados dos módulos (a) cosseno e (b) seno com o ajuste de entrada para cálculo de ângulos no intervalo de $[-\pi/2$ a $\pi/2]$.

Verificou que o **ajusta_entrada** funcionou de acordo com as especificações, apresentando o erro esperado.

4.2 Configuração do Modelo Cinemático em FPGA

Deseja-se implementar em FPGA o conjunto de etapas de cálculo modelados no Capítulo 3. No primeiro passo do cálculo, dado na Fig. 4.2, os ângulos θ_{1i} , θ_{2i} , θ_{3i} e θ_{4i} , cujos valores são oriundos de um potenciômetro, estavam codificados em binário, usando 11 bits, segundo a tabela 4.1 apresentada. Porém, durante a implementação, foi verificado que a saída do bloco somador ($add(+)$ - Fig. 4.2) poderia retornar ângulo fora do intervalo $[-\pi/2$ a $\pi/2]$, ocasionando um não funcionamento dos blocos sin e cos configurados.

Na Fig. 4.2, veem-se dois somadores, cada um dos quais recebe dois ângulos. Sabe-se que o resultado da soma de dois números binários contendo (N) bits cada um, deve ser codificado usando-se (N+1) bits. Por isto, cada uma destas somas é feita aumentando-se em um bit à esquerda cada operando.

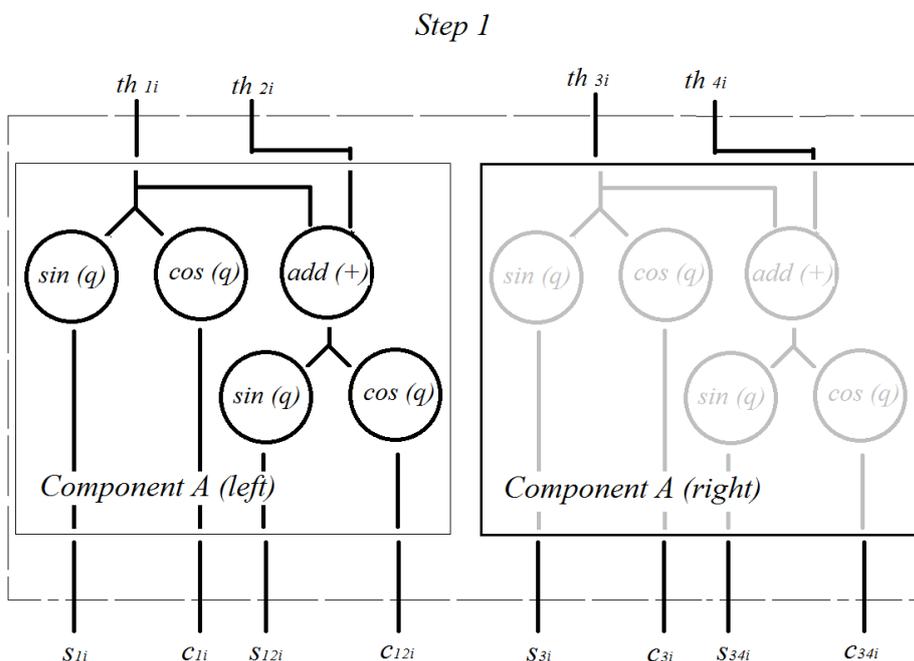


Figura 4.2: Configuração para implementação da cinemática em FPGA – Step1.

O problema foi corrigido com elaboração de uma nova tabela para codificação dos ângulos de entrada. Os ângulos serão codificados em binário, usando 12 bits (usa-se interpolação linear entre os valores extremos da tabela), conforme a tabela 4.4.

Tabela 4.4: Codificação com 12 bits, para os ângulos de entrada dos blocos.

<i>Entrada(rad)</i>	<i>Ângulo</i>
111111111111	π
...	...
110000000000	$\pi/2$
101111111111	$\pi/2$
...	...
100000000000	0
011111111111	0
...	...
010000000000	$-\pi/2$
001111111111	$-\pi/2$
...	...
000000000000	$-\pi$

Desta forma, à entrada, tanto o valor “011111111111” quanto o valor “100000000000” farão a saída valer “000000000000”, e as entradas “110000000000” e “101111111111”, bem como as entradas “010000000000” e “001111111111” farão as saídas valerem $\pi/2$ e $-\pi/2$, respectivamente.

O problema da nova faixa de valores de entrada para módulos que funcionassem no intervalo de $[-\pi$ a $\pi]$ foi resolvido da seguinte maneira:

Verificam-se os dois bits mais significativos para identificar o quadrante que ângulo de entrada pertence. O módulo usado para se fazer este ajuste continua sendo o “ajusta_entrada_12”. Sua nova especificação é:

- Sua entrada terá 12 bits e sua saída 10 bits;
- Os dois bits mais significativos da entrada não irão para a saída;
- Se entrada \geq “000000000000” e entrada \leq “001111111111”, basta copiarem-se para a saída os 10 bits menos significativos da entrada e por pertencerem ao terceiro quadrante, deve-se trocar o sinal do resultado do seno e cosseno;
- Se entrada \geq “010000000000” e entrada \leq “011111111111”, invertem-se os 10 bits menos significativos da entrada para a saída e por pertencerem ao quarto quadrante, deve-se trocar o sinal do resultado do seno;
- Se entrada \geq “100000000000” e entrada \leq “101111111111”, basta copiarem-se para a saída os 10 bits menos significativos da entrada;
- Se entrada \geq “110000000000” e entrada \leq “111111111111”, invertem-se os 10 bits menos significativos da entrada para a saída e por pertencerem ao segundo quadrante, deve-se trocar o sinal do resultado do cosseno.

A saída do módulo **ajusta_entrada_12** deverá ser fornecida ao módulo que calcula o cosseno (**hotbm_cos_x10_10_3_0_1_57_1**) e seno (**hotbm_sin_x10_10_3_0_1_57_1**).

Na Fig. 4.3, o valor c_{34i} , o qual é um cosseno e, portanto, $-1 \leq c_{34i} \leq +1$, é multiplicado pela constante a_4 .

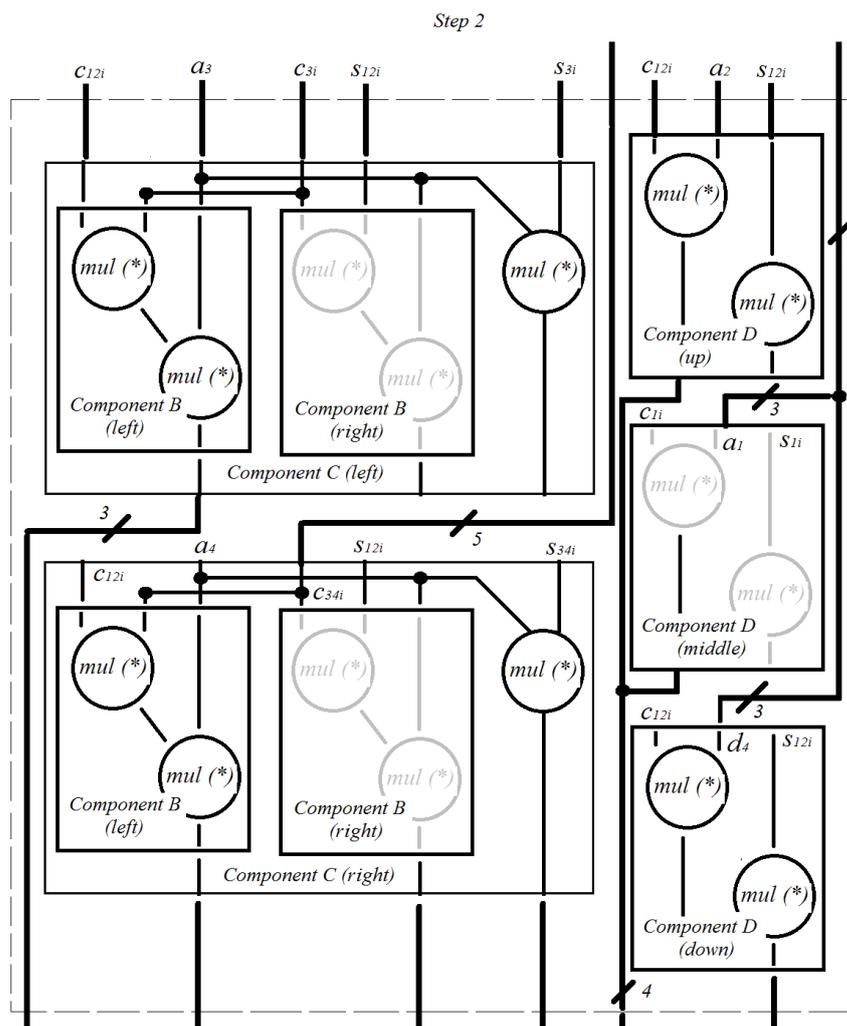


Figura 4.3: Configuração para implementação da cinemática em FPGA – Step2.

O multiplicador correspondente foi gerado pelo FloPoCo, usando-se o comando:

flopoco –pipeline = no IntConstMult 11 1527

Os valores das constantes que aparecem nas Fig. 4.3 são os parâmetros cinemáticos (notação de Denavit-Hartenberg) do robô hexápode apresentados na tabela 3.2 do Capítulo 3.

Deve-se notar que, aqui, a constante $a_4 = 152,7$ está multiplicada por 10, ou seja, não foi usada a informação de que o algarismo 7 está na parte fracionária. Assim, deve-se ter

em mente que o resultado é 10 vezes maior do que o esperado. Isto deverá ser levado em conta nas etapas seguintes.

O nome adotado para este módulo multiplicador é “**IntConstMult_11_1527**”. De forma similar, tentou-se gerar os multiplicadores pelas demais constantes, usando-se os comandos:

flopoco -pipeline = no IntConstMult 11 249

flopoco -pipeline = no IntConstMult 11 1042

flopoco -pipeline = no IntConstMult 11 1127

flopoco -pipeline = no IntConstMult 11 -465

flopoco -pipeline = no IntConstMult 11 -185

Porém, na geração dos multiplicadores por constantes negativas, surgiu o erro:

gmp: overflow in mpz type

Aborted

Por isto, em lugar destes últimos multiplicadores, foram gerados multiplicadores pelos módulos daquelas constantes, usando-se:

flopoco -pipeline=no IntConstMult 11 465

flopoco -pipeline=no IntConstMult 11 185

No sistema, deve-se lembrar de inverter o sinal do resultado destas multiplicações. Para isto, foi usado um processo que coloca em sua saída o oposto do valor de sua entrada.

Na Fig. 4.3, além dos multiplicadores por constantes, gerados conforme descrito anteriormente, há dois multiplicadores cujos operandos são variáveis. Cada um destes dois multiplicadores recebe, numa entrada, o resultado do cálculo de um seno ou de um cosseno e, na outra entrada, o resultado de uma multiplicação por constante. O resultado de um seno ou de um cosseno é gerado usando-se 11 bits. O resultado de uma multiplicação tanto pela constante a_1 como pela constante a_4 é gerado usando-se 22 bits.

Portanto, os dois multiplicadores devem ter cada um, uma entrada com 11 bits e a outra entrada com 22 bits. Este tipo de multiplicador foi gerado usando-se:

flopoco -pipeline=no SignedIntMultiplier 11 22

No arquivo em VHDL gerado, verificou-se que, sem o uso de pipeline, a multiplicação foi implementada usando-se, simplesmente:

R <= X * Y;

No terceiro passo (*step 3*) da cinemática, os blocos somadores (*add(+)*) utilizados foram os mesmos apresentados no passo um. Cada uma das somas é feita aumentando-se em um bit à esquerda de cada operando (bit MSB – bit sinal), de forma que o resultado da soma de dois números binários contendo (N) bits, seja codificado usando-se (N+1) bits.

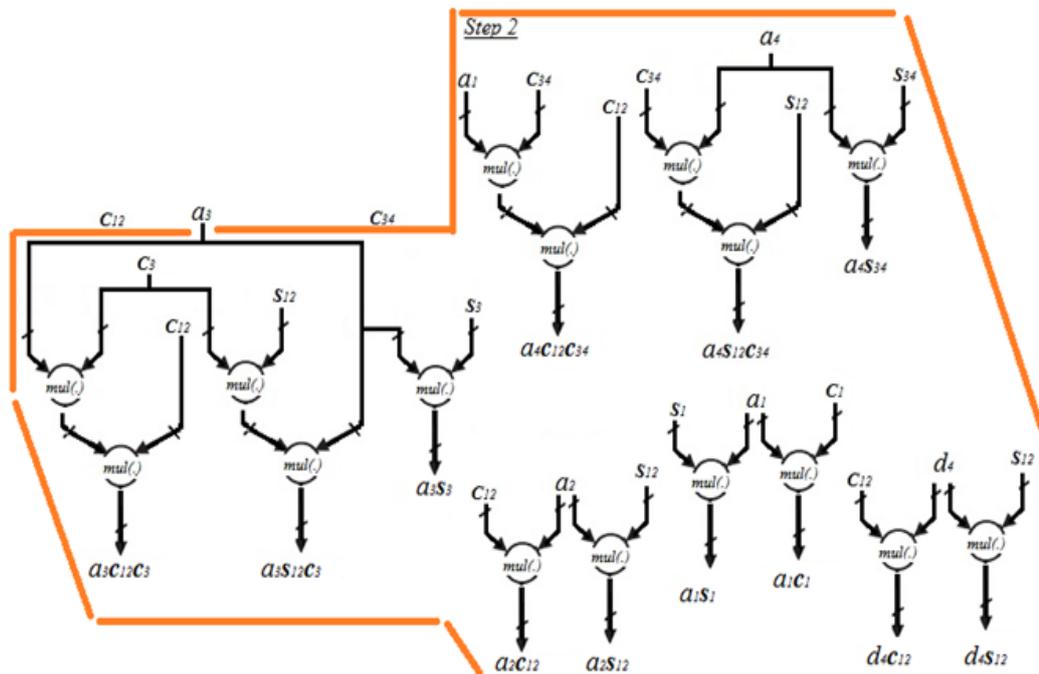


Figura 4.4: Configuração para implementação da cinemática em FPGA – Step3.

A configuração adotada para encontrar a resolução do modelo cinemático foi novamente simulada usando o *software* ISE WebPACK 13.2 da Xilinx. Porém, não foi possível obter a implementação em *hardware* da configuração proposta, pelo fato da placa de controle do robô possuir apenas 16 I/Os disponíveis para o usuário. Os dados oriundos do potenciômetro por um conversor A/D e as saídas para controle de cada um dos servomotores superam a capacidade da disponibilidade da placa. Devido estas circunstâncias, foram feitas apenas simulações e comparadas com os resultados obtidos pelo programa desenvolvido no MATLAB® 2011. Os resultados atenderam com precisão esperada e funcionaram de acordo com as especificações.

Capítulo 5 : Implementação dos Transdutores

5.1 Análise dos Esforços

Visto que, no ciclo de locomoção, os robôs com pernas alternam entre a fase de transferência e a fase de suporte, quando as pernas do robô estão em contato com o solo, os transdutores de força alocados em cada perna devem ser capazes de detectar o contato com o solo e medir a magnitude da força.

A fim de proporcionar sensoriamento de força para o robô, foi feita uma análise de elementos finitos (FEA – *Finite Element Analysis*) em uma das pernas do robô hexápode, utilizando o módulo COSMOSWorks do *software* SolidWorks® 2012.

A análise de elementos finitos exige a definição das propriedades do material para o modelo. Para um material isotrópico homogêneo, submetido em análise elástica linear, as propriedades em questão são: o módulo de elasticidade ou módulo de Young (E), coeficiente de Poisson (ν), e o módulo de cisalhamento (G).

O módulo de elasticidade é a relação entre a tensão aplicada e a deformação resultante de um material sólido, representado pela inclinação da curva – tensão (σ) x deformação (ϵ), na sua região elástica (Fig. 5.1). O coeficiente de Poisson é a relação entre a deformação longitudinal e deformação transversal de um material sujeito a carregamento. O módulo de cisalhamento é a relação entre tensão de cisalhamento e sua deformação específica (Kaliyamoorthy, 2001).

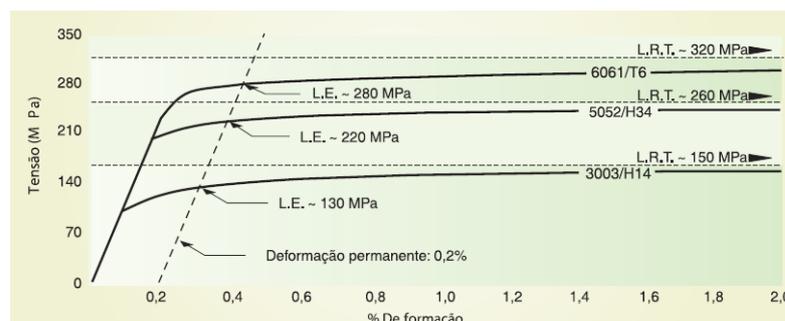


Figura 5.1: Curva tensão (σ) x deformação (ϵ) do alumínio.

Para gerar a malha usando as propriedades de deformação elástica do material das pernas, foram aplicadas cargas e restrições apropriadas na perna do robô, e com isso, foi possível encontrar diversos locais para medir forças utilizando as propriedades de deformação elástica do material da perna. Os locais que apresentaram os nós com maiores níveis de tensão e compressão durante o contato entre as pernas e o terreno estavam na parte superior da estrutura no segmento LK2 (Bachega *et al.*, 2012).

A análise da estrutura sólida foi designada como estática linear, sendo o estudo, feito com base na geometria inicial não deformada e desconsideradas as forças de inércia associadas às acelerações que cada um dos seus componentes fica sujeito (carregamento dinâmico).

Para análise linear, admite-se que não existe influência da modificação da geometria na distribuição dos esforços e tensões. Considera-se que os deslocamentos provocados pelas ações exteriores são muito pequenos quando comparados com as dimensões dos componentes da estrutura.

A Fig. 5.2 ilustra a deformação em um dos ligamentos (LK2) das pernas do robô hexápode com uma simulação de 15 N de força aplicada.

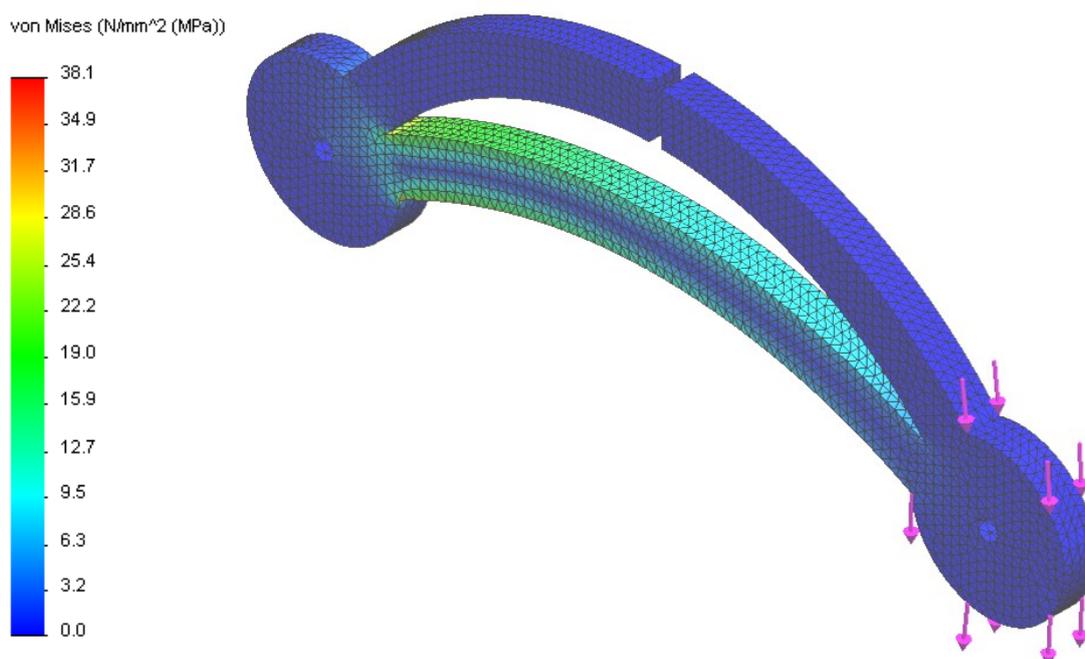


Figura 5.2: Deformação no segment LK2 – Análise estática linear – 15N

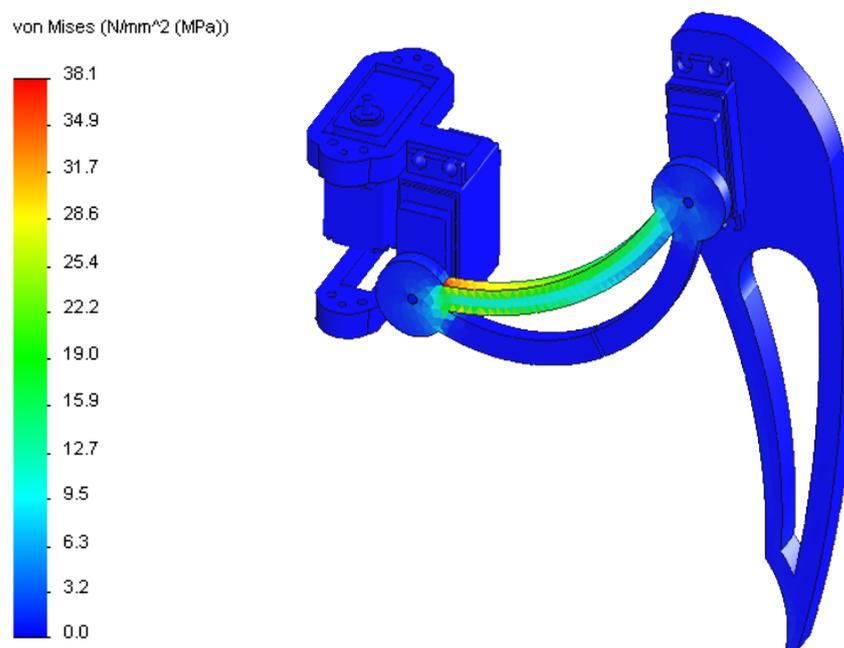


Figura 5.3: Análise de forças no conjunto de uma das pernas do robô.

Verificaram-se as distribuições das tensões de Von Mises, havendo maiores concentrações nas regiões próximas às avermelhadas onde se iniciou o escoamento.

Embora muito confiável, a análise de elementos finitos foi confirmada na prática, uma vez que existem fatores que não puderam ser completamente simulados, como as condições de carregamento dinâmico. Além do que, mudanças no tipo de material, dimensões e forma da seção poderiam afetar a confiabilidade das medições em toda a gama de interesses.

5.2 Alocações dos Sensores

Para aferição, as medições são realizadas indiretamente. Muitas vezes, a quantidade física a ser medida é convertida por um transdutor em um sinal elétrico que pode ser amplificado e registrado. A quantidade física a ser medida é a força por meio de deformações em sua região elástica. Por esta razão, extensômetros são geralmente implementados de forma satisfatória para medição das forças em mecanismos submetidos a tensões (Kalakrishnan *et al.* 2009).

Para validação da FEA efetuada, extensômetros foram fixados em cada perna,

teoricamente nas melhores posições da estrutura mecânica, para obter as forças de reação nos ligamentos como apresenta a Fig. 5.4.

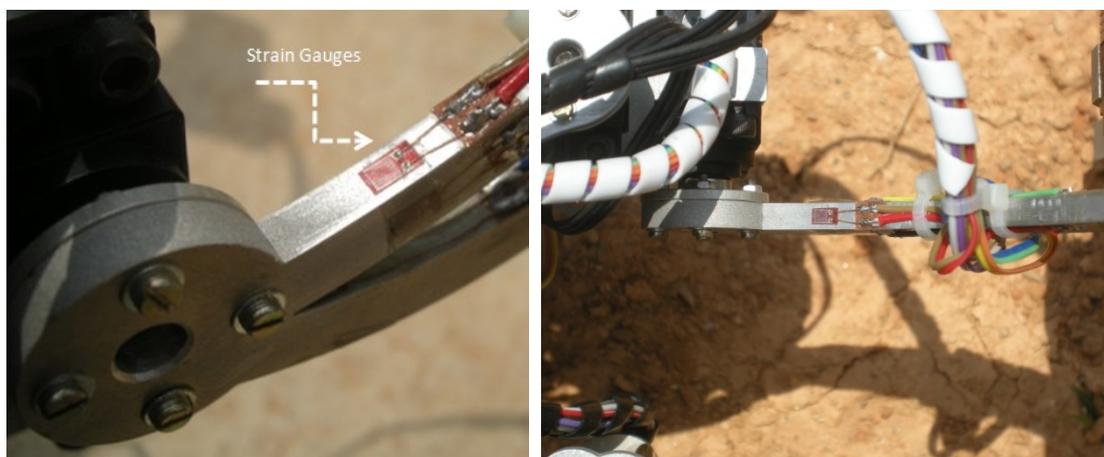


Figura 5.4: Alocação dos extensômetros no LK2 na configuração ponte completa de Wheatstone para medidas de forças.

Os transdutores foram colocados em uma configuração de ponte completa de *Wheatstone* para aumentar a sensibilidade do conjunto. Entretanto, a configuração opera como uma meia ponte, porque dois extensômetros foram fixados em uma região sem tensão ou compressão para serem usados como resistências de referência.

5.2.1 Procedimentos de Calibração

Os sensores instalados nas pernas do Myrmex-I foram calibrados utilizando massas de referência, cujas características são apresentadas na Tabela 5.1. A força peso aplicada foi obtida simplesmente pelo produto das massas com a aceleração da gravidade. Diversos ensaios de calibração foram realizados nas pernas do robô.

Em cada caso, as massas foram colocadas sob os ligamentos nas direções e sentidos cujo transdutor de força estava sendo calibrado. A tensão de saída da ponte foi encontrada por meio de um amplificador de instrumentação utilizando o circuito INA2126 da Texas Instruments, e os dados foram gravados em tempo real por uma placa de aquisição de dados

(NI USB-6009) da National Instruments que possui 14-bits de resolução e 48KS/s de amostragem. Os dados obtidos (Tabela 5.2 e 5.3) mostram que a influência das cargas laterais e normais em cada um dos sensores não são desprezíveis.

Tabela 5.1: Massas de Referência para Calibração.

MASSAS	VALOR (KG)	FORÇA PESO APLICADA (N)
M ₁	0.050	0.490
M ₂	0.075	0.735
M ₃	0.165	1.618
M ₄	0.190	1.863
M ₅	0.435	4.267

Tabela 5.2: Medidas de Tensão na Direção Normal.

MASSAS	TENSÃO MEDIDA (V)	TENSÃO MEDIDA (V)
	SENTIDO HORÁRIO	SENTIDO ANTI-HORÁRIO
S/ Carga	3.87	3.88
M ₁	3.825	3.925
M ₂	3.80	3.94
M ₃	3.74	4.02
M ₄	3.70	4.05
M ₅	3.50	4.19

Tabela 5.3: Medidas de Tensão na Direção Lateral

MASSAS	TENSÃO MEDIDA (V)	TENSÃO MEDIDA (V)
	SENTIDO HORÁRIO	SENTIDO ANTI-HORÁRIO
S/ Carga	3.845	1.55
M ₁	3.87	1.52
M ₂	3.85	1.50
M ₃	3.85	1.44
M ₄	3.86	1.43
M ₅	3.86	1.27

As características lineares dos resultados do primeiro experimento de calibração dos sensores de força construídos em cada uma das pernas do robô são mostradas na Fig.5.5. Os dados representam os gráficos gerados a partir dos dados experimentais (linhas em azul) e dos valores obtidos a partir dos polinômios construídos (linhas em vermelho).

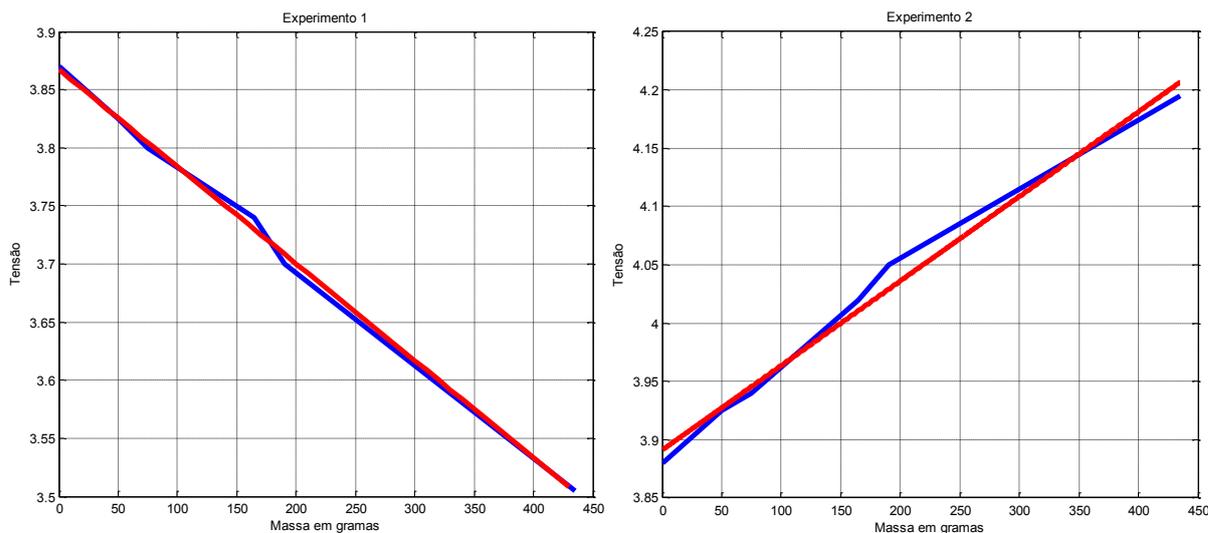


Figura 5.5: Resultados de calibração e desempenhos aproximadamente lineares dos transdutores de força medidos nas direções normal e lateral em ambos os sentidos.

A calibração consiste em calcular uma matriz diagonal que representa a relação entre a tensão elétrica medida em cada um dos transdutores sobre as pernas do robô e a força aplicada. Para isso, o robô foi colocado em situação estática e o controle de posição atuava nos servos com incrementos de 2 mm, movendo a perna para baixo até que um valor de tensão constante fosse medido na saída da ponte como mostra a Fig. 5.6.

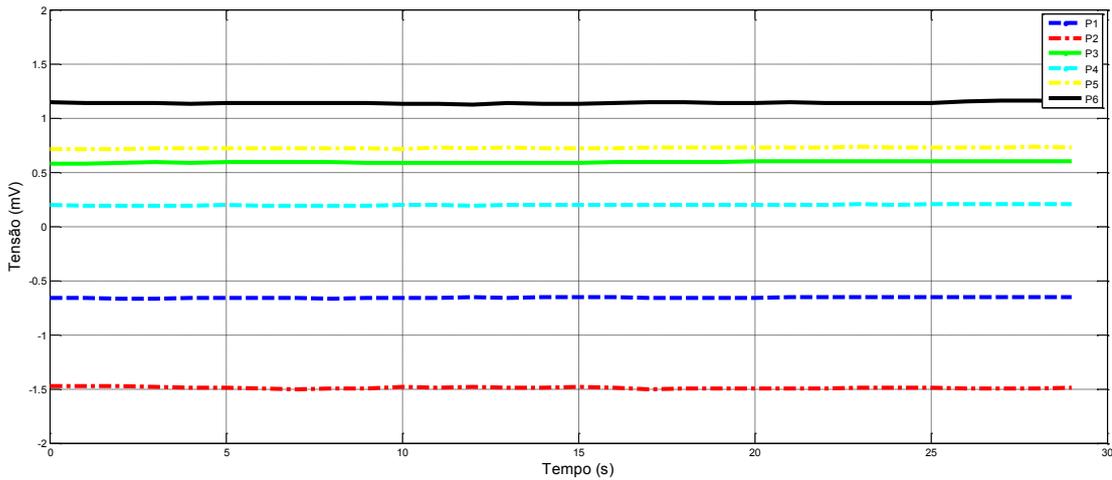


Figura 5.6: Tensões constantes medidas nas saídas amplificadas das pontes de Wheatstone de cada perna.

A matriz de calibração foi definida e expressa como: $[f_{n_i}] = 1/v_r G \Delta_v$ onde G representa uma matriz diagonal, v_r é a tensão de alimentação das pontes de Wheatstone e Δ_v é a diferença do vetor de tensão medido pelos transdutores. Resultando na seguinte equação de forças:

$$\begin{bmatrix} f_{n_1} \\ f_{n_2} \\ f_{n_3} \\ f_{n_4} \\ f_{n_5} \\ f_{n_6} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_r} [k_1 \quad k_2 \quad k_3 \quad k_4 \quad k_5 \quad k_6] \begin{bmatrix} v_{df_{n_1}} - v_{sf_{n_1}} \\ v_{df_{n_2}} - v_{sf_{n_2}} \\ v_{df_{n_3}} - v_{sf_{n_3}} \\ v_{df_{n_4}} - v_{sf_{n_4}} \\ v_{df_{n_5}} - v_{sf_{n_5}} \\ v_{df_{n_6}} - v_{sf_{n_6}} \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

Onde: f_{n_i} representam as forças medidas nos i -ésimos ligamentos (LK2); $v_{df_{n_i}}$ são as tensões medidas nas pontes devido à deformação dos esforços aplicados; $v_{sf_{n_i}}$ são as tensões medidas na ponte sem os esforços.

5.2.2 Avaliação Experimental – Extensômetros

Os resultados de cada experimento mostraram ser especialmente sensíveis às forças aplicadas sobre a estrutura mecânica do robô. A instrumentação foi sistematicamente verificada por meio de avaliações experimentais.

No primeiro caso, Myrmex-I foi colocado com o corpo a uma altura de 60 mm acima do solo. Durante a análise, o robô toca o chão e chega à estabilização do sistema no tempo de 3s. No instante de 10s a força total média encontrada foi de 37,71 N (massa de 3,844 kg), o que representou um aparente erro de 1,5% em relação ao valor real do peso do robô (massa de 3,788 kg).

No segundo experimento foi aplicada uma perturbação externa (massa de 0,85 kg – 8,34 N) no intervalo de 30s a 60s. A medição da força média estava em 37,71 N enquanto o robô permanecia em condição de estabilidade estática, sem a massa extra em cima. Quando o objeto foi adicionado, a força média registrada, foi de 48,45 N (4,94 kg). Durante o tempo de 30 segundos a massa permaneceu no topo da estrutura do robô e erro de medição calculado foi de 6,4%. Procurou-se utilizar o ligamento LK2, pois ele não está sujeito a tantos choques e vibrações como o ligamento LK1, evitando ruídos indesejáveis até o amplificador. Outra vantagem é ter uma área de fixação dos extensômetros de fácil acesso, facilitando a conexão e reparo.

5.3 Intensidades de Correntes nos Motores

A fim de encontrar uma relação entre os dados encontrados dos transdutores e a intensidade de corrente nos motores foi realizado um experimento de monitoramento das correntes por meio de resistores (*shunts*). As Tabelas 5.4 – 5.7 apresentam os índices de tensões dados pelas intensidades médias de correntes obtidas a partir de situações onde o robô encontrava-se em caráter estático, porém, alternando configurações dos movimentos das pernas entre a fase de suporte, como ilustra a Fig. 5.7.

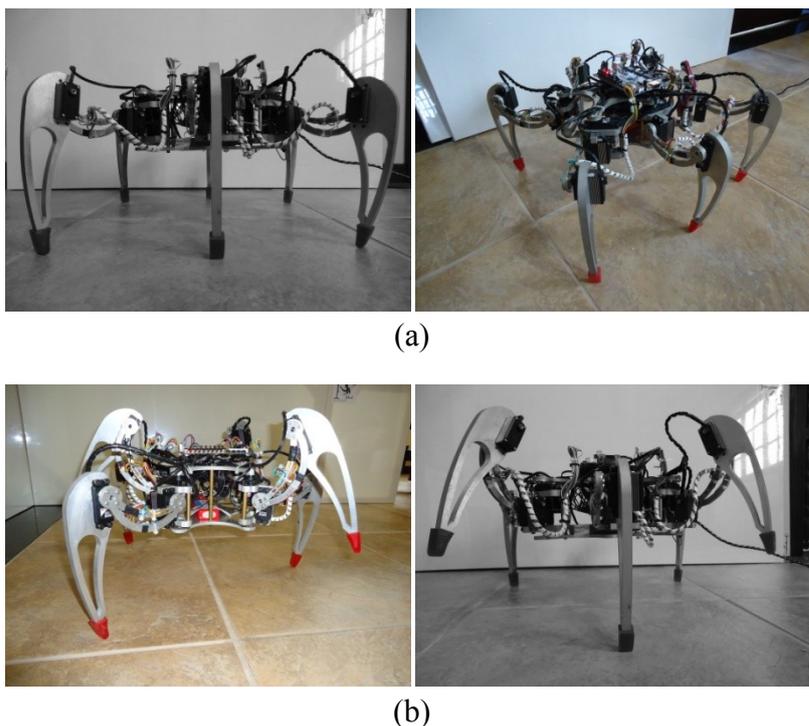


Figura 5.7: Exemplos de configurações adotadas no experimento: (a) vista lateral e perspectiva – seis pernas em contato com o solo; (b) vista frontal e lateral – trípode com P1, P3 e P5 em contato com o solo.

Tabela 5.4: Intensidades de correntes nos motores – seis pernas no solo.

Correntes Perna(i) Motor(j)	Altura do Corpo (60 mm)		
	Média da Perna (mA)	Total da Perna (mA)	Total Motores m1, m2 e m3 (mA)
<i>i11</i>	8,46		
<i>i12</i>	230	246,98	
<i>i13</i>	8,52		
<i>i21</i>	8,62		50,9
<i>i22</i>	250	258,62	
<i>i23</i>	8,31		
<i>i31</i>	8,24		
<i>i32</i>	262	278,72	
<i>i33</i>	8,48		
<i>i41</i>	8,50		1506,0
<i>i42</i>	250	266,62	
<i>i43</i>	8,12		
<i>i51</i>	8,74		
<i>i52</i>	248	256,74	
<i>i53</i>	8,24		
<i>i61</i>	8,34		33,58
<i>i62</i>	266	282,80	
<i>i63</i>	8,46		

Tabela 5.5: Intensidades de correntes nos motores – pernas (4,6 e 2) apoiadas.

Correntes Perna(i) Motor(j)	Altura do Corpo (60 mm)		
	Média da perna (mA)	Total da Perna (mA)	Total Motores m1, m2 e m3 (mA)
i11	7,76		
i12	16,34	31,4	
i13	7,30		
i21	250		289,96
i22	344	594,0	
i23	8,10		
i31	7,90		
i32	15,96	31,34	
i33	7,48		
i41	8,12		1060,56
i42	356	369,5	
i43	5,38		
i51	8,20		
i52	16,26	24,46	
i53	8,01		
i61	7,98		26,58
i62	312	326,78	
i63	6,80		

Tabela 5.6: Intensidades de correntes nos motores – pernas (1,3 e 5) apoiadas.

Correntes Perna(i) Motor(j)	Altura do Corpo (60 mm)		
	Média da perna (mA)	Total da Perna (mA)	Total Motores m1, m2 e m3 (mA)
i11	204		
i12	202	413,48	
i13	7,48		
i21	7,74		651,72
i22	16,2	32,04	
i23	7,69		
i31	192		
i32	276	475,76	
i33	7,76		
i41	7,94		1114,44
i42	15,26	31,24	
i43	8,04		
i51	232		
i52	504	736	
i53	8,10		
i61	8,04		31,12
i62	16,0	23,94	
i63	7,93		

Tabela 5.7: Correntes consumidas nos motores – pernas (1,3,4, e 6) apoiadas.

Correntes Perna (i) Motor (j)	Altura do Corpo (60 mm)		
	Média da perna (mA)	Total da Perna (mA)	Total Motores m1, m2 e m3 (mA)
<i>i11</i>	8,22		
<i>i12</i>	252	270,56	
<i>i13</i>	7,78		
<i>i21</i>	8,06		57,26
<i>i22</i>	16,12	24,24	
<i>i23</i>	7,76		
<i>i31</i>	7,84		
<i>i32</i>	270	307,05	
<i>i33</i>	16,08		
<i>i41</i>	16,4		1094,16
<i>i42</i>	248	268	
<i>i43</i>	6,16		
<i>i51</i>	8,20		
<i>i52</i>	16,04	24,18	
<i>i53</i>	7,46		
<i>i61</i>	8,54		36,98
<i>i62</i>	292	293,92	
<i>i63</i>	6,96		

Os dados dependem apenas da força gravitacional sem levar em conta o fator velocidade, e novamente foram coletados em tempo real, utilizando a placa de aquisição de dados (NI USB-6009) da National Instruments.

Verificou-se que a forma adotada para o método de medição de corrente baseado em uma resistência de baixo valor ($0,47 \Omega \pm 1\% - 1 \text{ W}$) em série com a alimentação do servo permitiu uma leitura simplificada e com resultado sempre disponível (sem necessidade de algoritmos para medição de largura de pulsos).

Dado o baixo valor das resistências utilizadas, sua presença não provocou o aumento significativo da corrente consumida pelo servo (resultante da queda de tensão nos resistores).

Capítulo 6 : Resultados e Simulações

O sistema adotado para identificação das pernas do robô é apresentado na Fig. 6.1. O sistema apresentado foi utilizado como referência para todos os outros experimentos feitos no decorrer desta pesquisa.

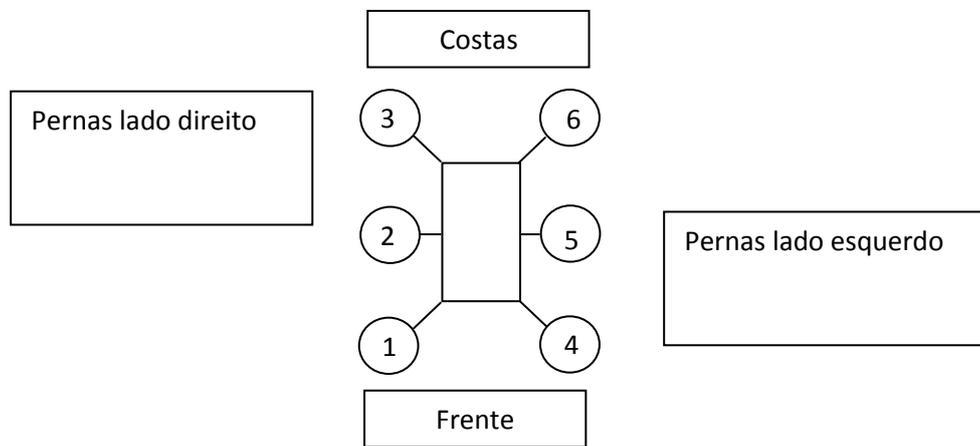
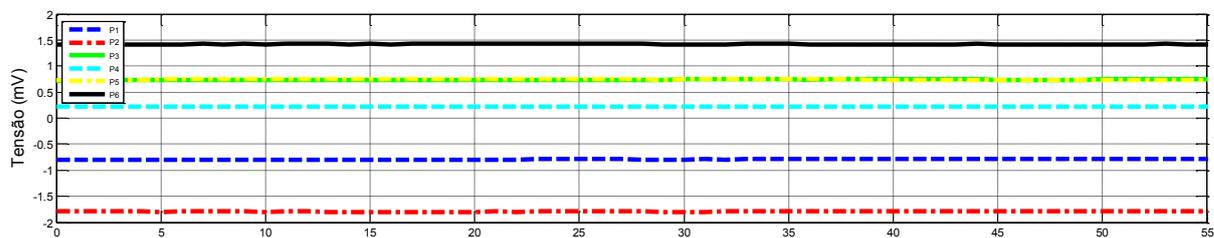


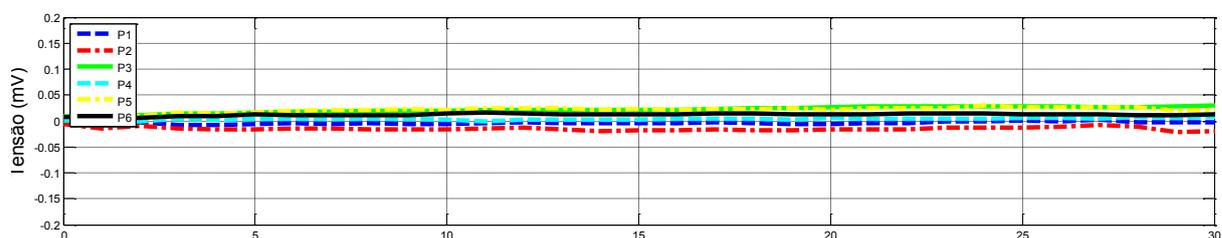
Figura 6.1: Sistema para identificação das pernas do robô, usado em todos os experimentos.

6.1 Estudo Estático

Experimentos foram analisados em situação estática como ilustrou a Fig. 5.6(a) e repetiu-se o processo para verificar a variação dos esforços nos ligamentos. Os dados foram ajustados para que os esforços se mantivessem próximos de zero na situação estática. A Fig. 6.2 apresenta os resultados adquiridos antes, e após, os ajustes dos esforços.



(a)



(b)

Figura 6.2: Esforços em situação estática (a). Posição de referência ajustadas para simulações estáticas e dinâmicas (b).

Um novo estudo foi feito para medir os esforços em cada uma das pernas do robô em situação estática, porém, com o robô posicionado em uma rampa com inclinação de 30 graus com relação ao plano (terreno regular). As Fig. 6.3 a 6.6 apresentam as saídas de todas as pernas nas situações propostas.

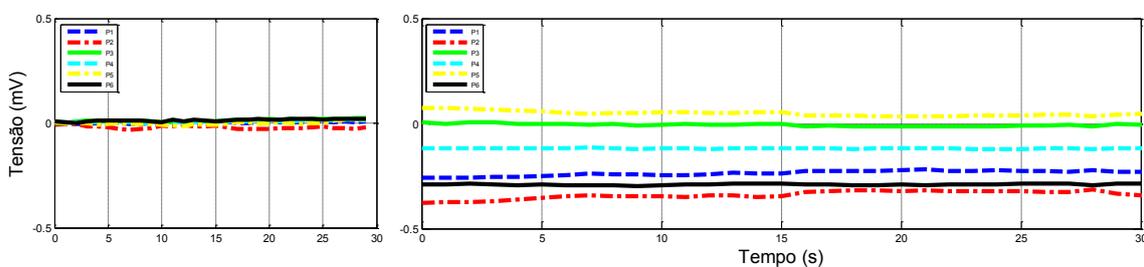


Figura 6.3: Comparação (posição de referência) com posição estática inclinada (robô posicionado de frente com uma inclinação de 30° em relação ao plano).

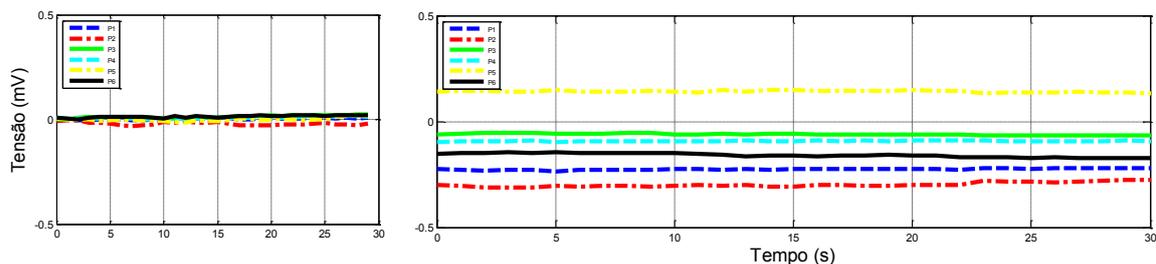


Figura 6.4: Comparação (posição de referência) com posição estática inclinada (robô posicionado de costas com uma inclinação de 30° em relação ao plano).

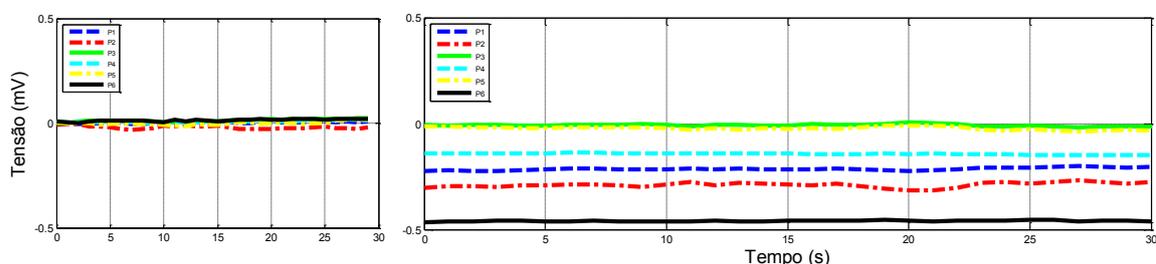


Figura 6.5: Comparação (posição de referência) com posição estática inclinada (robô posicionado de lado (esquerdo) com uma inclinação de 30° em relação ao plano).

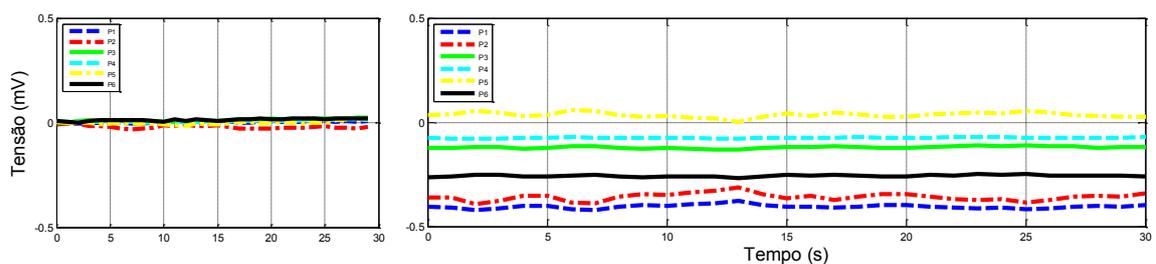


Figura 6.6: Comparação (posição de referência) com posição estática inclinada (robô posicionado de lado (direito) com uma inclinação de 30° em relação ao plano).

Em cada uma das situações os sinais foram comparados com o robô no plano, sendo possível identificar as pernas que sofrem os maiores esforços. As situações também foram analisadas e comparadas com os dados de intensidades de correntes obtidos no Capítulo 5. Os esforços medidos convergem com os adquiridos nos motores.

6.2 Estudo Dinâmico

No estudo dinâmico, alguns experimentos foram realizados para verificar os esforços presentes nas pernas do robô durante sua locomoção.

O primeiro experimento foi feito para analisar os esforços presentes durante o levantamento do robô. O robô estava sobre o solo em um terreno regular, e o experimento foi repetido três vezes para verificar se haveria grandes alterações nos resultados oriundos dos transdutores. A Fig. 6.7 apresenta os dados coletados durante

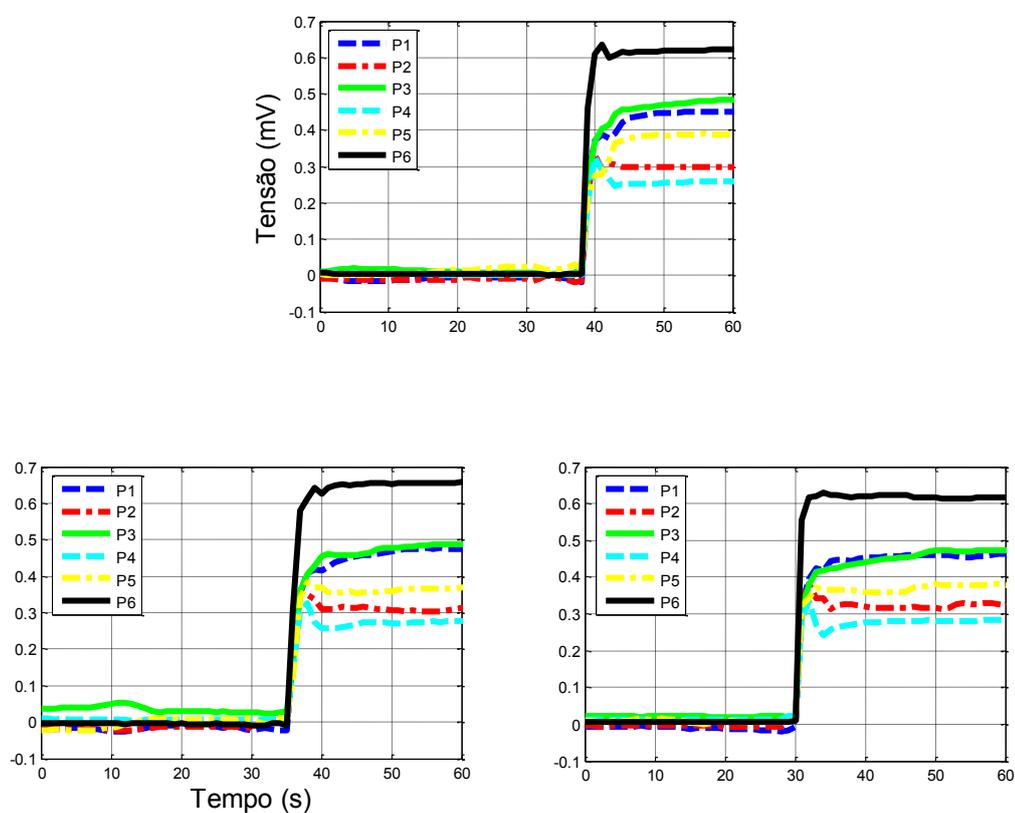
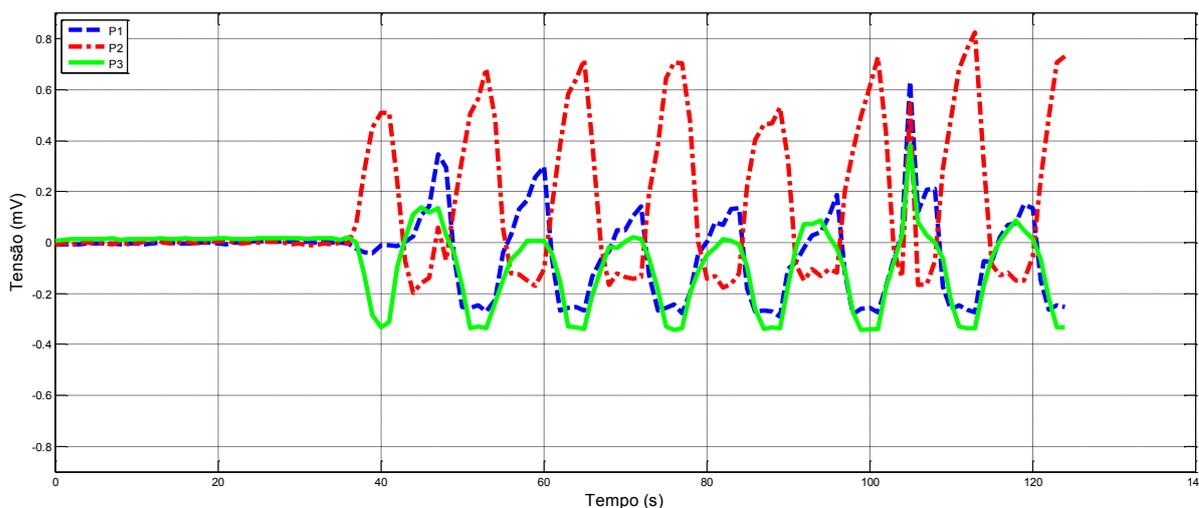
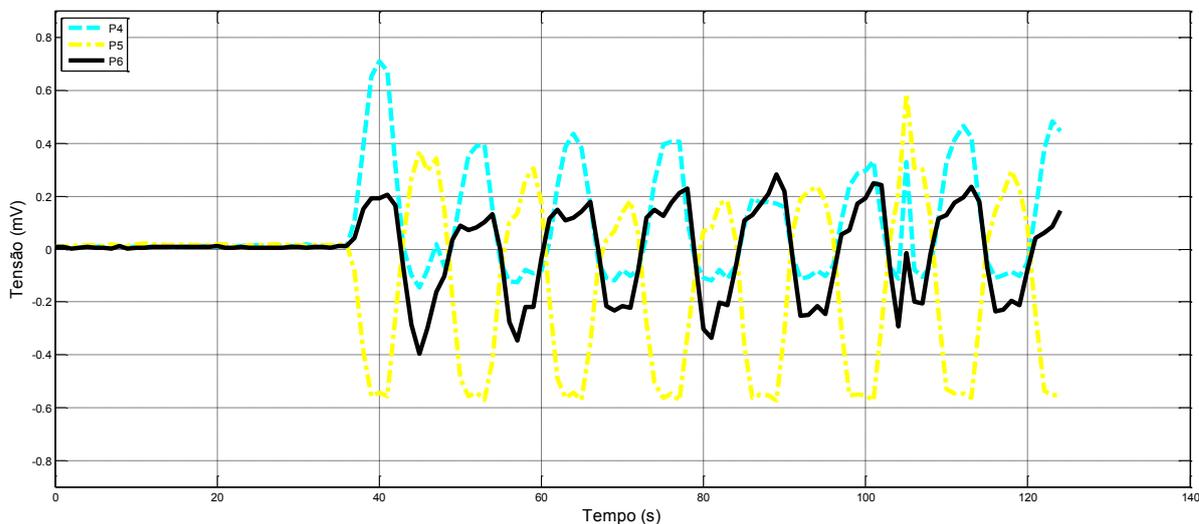


Figura 6.7: Experimentos dinâmicos - robô em situação de estabilidade estática no plano regular, levantando-se após aproximadamente 30 segundos.

No segundo experimento o robô efetuou uma locomoção de alta velocidade (marcha trípede) em superfície regular. Os dados revelam (Fig. 6.8 e 6.9) as fases de suporte e transferência de cada conjunto trípede (P1, P3 e P5 ou P2, P4 e P6) no movimento de locomoção, sendo que o robô é possível de identificar as forças de reação em situações estática ou dinâmicas.

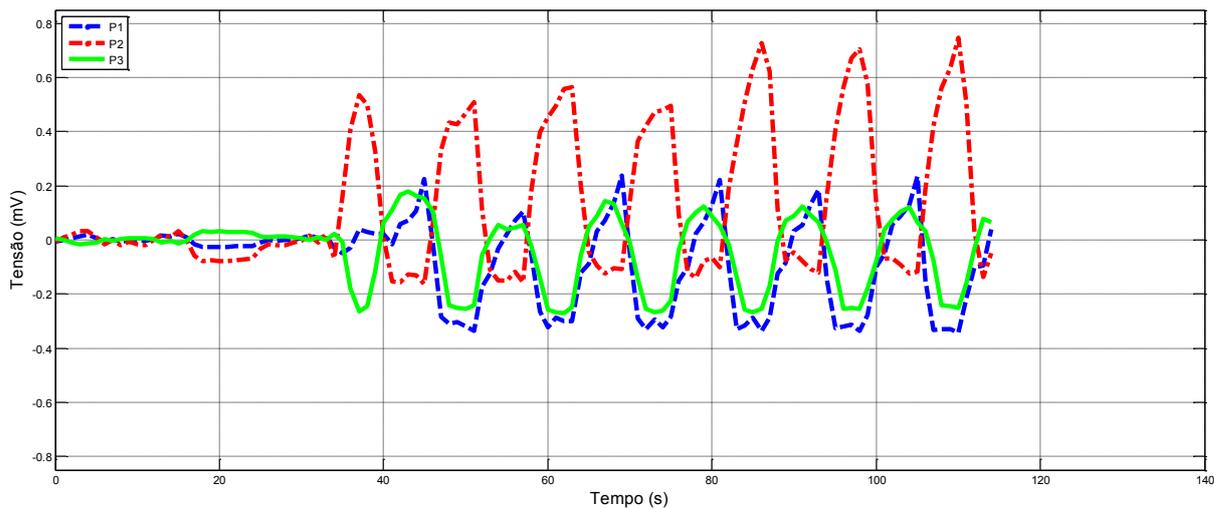


(a)

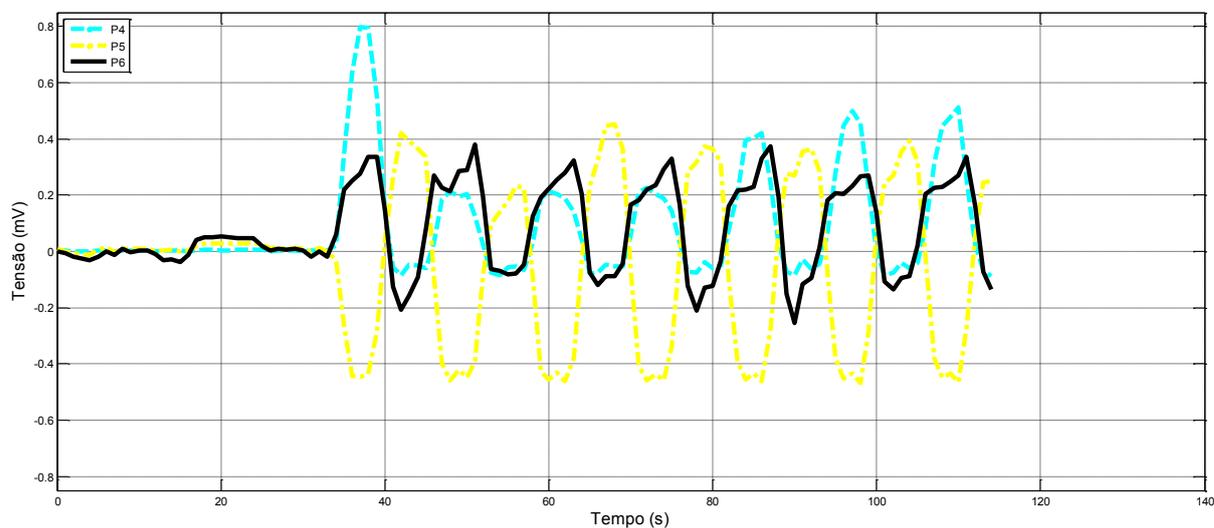


(b)

Figura 6.8: Caminhada trípede em superfície plana – a) representa os dados relativos às pernas do lado direito – b) representa os dados das pernas do lado esquerdo do robô.



(a)



(b)

Figura 6.9: Caminhada trípole em superfície plana (segunda simulação) – a) representa os dados relativos às pernas do lado direito – b) representa os dados das pernas do lado esquerdo do robô.

Capítulo 7 : Conclusão, Discussões dos resultados e Perspectivas de Desenvolvimentos Futuros

Este estudo mostrou o projeto e desenvolvimento de robôs móveis com pernas biologicamente inspirado apresentando as vantagens que este possui em relação a sistemas que utilizam rodas, pois esses, não necessitam de uma superfície de suporte contínua, e com isso, são capazes de adaptar-se facilmente a superfícies irregulares. Entretanto, estes robôs exibem modelos cinemáticos e dinâmicos complexos que impõem dificuldades não encontradas em robôs com locomoção com rodas. A construção do robô baseado nas configurações estudadas mostrou ser flexível e permitindo o caminhar em ambientes acidentados e não estruturados.

A criação da estrutura baseada em FPGA para a configuração dos algoritmos da cinemática inversa e a solução do problema de implementar cálculos trigonométricos foi bem sucedida utilizando o programa gerador de módulos aritméticos FloPoCo. Com isso, pode-se obter a configuração de uma aplicação específica aproveitando a grande capacidade de processamento em paralelo e a rápida execução de algoritmos complexos.

Nas condições atuais do projeto verificou-se que, após simulações nos programas durante a construção do robô, foi possível encontrar pontos que sofrem maiores tensões durante a locomoção para fixação dos extensômetros. A medição das tensões em cada segmento (LK2) da perna foi bem sucedida e os resultados lineares obtidos mostram-se úteis para analisar a configuração estrutural do robô que é capaz de identificar esforços em sua estrutura mecânica.

Análises de locomoção (situações estáticas e dinâmicas) foram desenvolvidas. A matriz de calibração foi definida e as forças de reação podem ser encontradas em cada uma das pernas do robô em diferentes tipos de configurações ou padrões de locomoção. Os resultados obtidos até o momento, representam o conjunto de entradas do algoritmo que permitem seu controle dinâmico.

O cumprimento dos objetivos propostos no início do trabalho levou o desenvolvimento de aspectos inerentes ao progresso na compreensão fenômenos envolvidos na locomoção de robôs móveis com pernas. Os resultados alcançados representam a evolução do conhecimento existente e abrem diversas perspectivas de continuação e melhoria tais como: aperfeiçoar o caminhar, minimizar o consumo de energia, evitar o risco de deslizamento do pé, investigar distribuição de forças e expandir capacidades operacionais.

Referências Bibliográficas

- [1] A. Bowling, “Impact Forces and Mobility in Legged Robot Locomotion,” in: *IEEE Int. Conf. Advanced Intelligent Mechatronics*, pp. 1-8, 4-7 September 2007.
- [2] A. Preumont, P. Alexandre and D. Ghuys, “Gait Analysis and Implementation of a Six Leg Walking Machine,” in: *9IICAR, Fifth International Conference on Advanced Robotics ‘Robots in Unstructured Environments,’* Pisa, Italy, Vol. 2 (Jun. 19–22, 1991) pp. 941–945.
- [3] A. Roennau, G. Heppner, T. Kerscher, R. Dillmann, “Fault Diagnosis and System Status Monitoring for a Six-Legged Walking Robot” in: *IEEE Int. Conf. Advanced Intelligent Mechatronics*, pp. 874-879 July 2011.
- [4] D. M. Gorinevsky, A. M. Formalsky, and A. Y. Schneider, “Force Control and Robotics Systems,” in *CRC Press*, July 1997.
- [5] D. M. Gorinevsky, and A. Y. Schneider, “Force Control in Locomotion of Legged Vehicles over Rigid and Soft Surfaces,” *The Int. Journal of Robotics Research* vol. 9, pp 4–23, April 1990.
- [6] D. Marhef, and D. Orin, “Quadratic Optimization of Force Distribution in Walking Machines,” in: *IEEE Int. Conf. on Robotic and Automation*, pp. 477–483, 16-20 May 1998.
- [7] D. Orin, and S. Oh, “Control of Force Distribution in Robotic Mechanisms Containing Close-Kinematics Chains,” in: *Journal Dynamic Syst. Meas. and Control* vol. 102, pp. 134–141, June 1981.
- [8] D. Spenneberg, K. McCullough, F. Kirchner, “Stability of Walking in a Multilegged Robot Sufering Leg Los”, in: *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3828-3833.
- [9] G. M. Nelson, R. D. Quinn, R. J. Bachmann, W.C. Flannigan, R. E. Ritzmann, J. T. Watson, “Design and Simulation of a Cockroach-like Robot” in: *Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1106-1111.
- [10] G. P. Santos, E. Garcia, R. Ponticelli, M. Armada, “Minimizing Energy Consumption in Hexapod Robots”, *Advanced Robotic*, Vol. 23, pp. 681–704, 2009.

- [11] H. Montes, S. Nabulsi, and M. A. Armada, “Reliable, Built-in, High-Accuracy Force Sensing for Legged Robots,” in: *The Int. Journal of Robotics Research*, vol. 25, pp. 931–950, September 2006.
- [12] J. Detrey, F. Dinechin, “A VHDL Library of LNS Operators”, in: *37th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, 2003.
- [13] J. Detrey, F. Dinechin, “Floating-point Trigonometric Functions for FPGAs”, in: *Field-Programmable Logic and Applications*, pp. 29-34. IEEE, 2007.
- [14] J. Estremera and P. G. Santos, “Free Gaits for Quadruped Robots over Irregular Terrain” *The Int. Journal of Robotics Research* vol. 22, pp 115–13, 2003.
- [15] J. J. Craig, “Introduction to Robotics – Mechanics and Control”, 3rd, Pearson, 1986.
- [16] J. M. Yang, J. H. Kim, “Fault Tolerant Gait Generation of Locked Joint Failures”, in *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, pp. 2237-2242.
- [17] M. G. Bekker, “Introduction to terrain vehicle systems”, An Arbor: University of Michigan Press, 1969.
- [18] M. Kalakrishnan, J. Buchli, P. Pastor, and S. Schaal, “Learning Locomotion over Rough Terrain using Terrain Templates” in: *IEEE Int. Intelligent Robots and Systems*, pp. 167–172, 2009.
- [19] M. F. Silva, T. Machado, A. M. Lopes, “Modelling and Simulation of Artificial Locomotion Systems”, *Robotica*, Vol. 23, pp. 595–606, 2005.
- [20] R. D. Quinn, G. M. Nelson, and R. J. Bachmann, “Insect Designs for Improved Robot Mobility,” in: *Proc. 4th Int. Conf. Climbing and Walking Robots*, pp. 69–76, Germany, 2001.
- [21] R. Hartenstein, “The Microprocessor is no Longer General Purpose: Why Future Reconfigurable Platforms Will Win,” in: *IEEE. Proceedings Conference on Innovative Systems in Silicon*. pp. 2–12, USA, 1997.
- [22] R. P. Bachega, A. B. Campo, R. Pires, “Desenvolvimento de um Modelo Computacional para Análise Cinemática e Simulação de Trajetórias para Robôs Hexápodes,” In: *WORKSHOP ROBOCONTROL, 2010*.
- [23] R. P. Bachega, A. B. Campo, R. Pires, “Hardware Configuration of Hexapod Robot to Force Feedback Control Development” In: *44th IEEE Southeastern Symposium on System Theory*, pp. 115-120, USA, March 2012.

- [24] S. Kaliyamoorthy, S. N. Zill, R. D. Quinn, R. E. Ritzmann, and J. Choi, “Finite Element Analysis of Strains in a Blaberus Cockroach Leg During Climbing,” in: *IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, vol. 2, pp. 833–838, 2001.
- [25] Song, S-M., and Waldron, K.J, “Machines That Walk – The Adaptive Suspension Vehicle,” *The MIT Press. Cambridge, Massachusetts London, England*, 1989.
- [26] V. Kumar, and K. Waldron, “Force Distribution in Closed Kinematics Chains,” in: *IEEE Int. Conf. of Robotics and Automation*, vol. 25, pp. 931–950, 24-29 April 1988.
- [27] W. Jiang, A. Liu, and D. Howar, “Optimization of Legged Robot Locomotion by Control of Foot Force Distribution,” in: *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, vol. 26, pp. 311-323, October 2004.
- [28] Zomaya, A. “Parallel Processing for Robot Dynamics Computations.” *Parallel Computing*, v. 21, n. 4, pp. 649–668, Nov. 1995.
- X. Wang, “Variable Precision Floating-point Divide and Square Root for Efficient FPGA Implementation of Image and Signal Processing Algorithms” *These (Doctored)* — Northeastern University, 2007.

Glossário

Ciclo de locomoção: sequência de movimentos das pernas e do corpo que se repetem periodicamente.

Estabilidade dinâmica: define-se que um robô móvel com pernas é dinamicamente estável se o momento causado pela resultante das forças e torques, aplicados sobre o centro de gravidade do robô em torno dos limites do polígono de apoio, é positivo.

Estabilidade estática: o robô com pernas é esteticamente estável em um intervalo t , se reduzir a zero as velocidades de translação e rotação do sólido rígido resultante. Mantendo fixas todas as posições dos pés, permanecendo em contato com o plano de apoio.

Fator de ocupação: fração temporal do tempo de ciclo T do padrão de locomoção durante o qual a i -ésima perna se encontra na fase de suporte.

Fase da perna, Φ_i : Fração do tempo de ciclo T , correspondente ao atraso entre o contato da perna i e o contato da perna 1 com o solo.

Fase de apoio ou suporte: fração do tempo de ciclo de locomoção, decorridos desde o apoio da perna do robô até o seu levantamento, ou seja, o período de tempo durante o qual o ponto de apoio da perna do robô se encontra em contato com o solo, suportando o corpo e o empurrando na direção determinada.

Fase de recuperação ou transferência: fração do tempo de ciclo de locomoção, decorridos desde o levantamento de uma perna até o seu apoio, ou seja, o período de tempo em que o ponto de apoio da perna do robô não se encontra em contato com o solo e se desloca para o próximo local de apoio.

Graus de liberdade: número de coordenadas independentes necessárias para descrição completa da posição e orientação do mecanismo. Número de maneiras independentes que o efetuador (*end-effector*) possui para se mover. Número de juntas de translação e rotação em um robô.

Margem de estabilidade: amplitude que quantifica o grau de estabilidade do robô.

Margem de estabilidade dinâmica: menor dos momentos em torno dos limites do polígono de apoio devido às forças e momentos resultantes que atuam sobre o centro de gravidade do robô, normalizando em relação ao peso.

Margem de estabilidade estática: menor das distâncias da projeção vertical do centro de gravidade da máquina aos vértices do polígono de apoio. Um robô com pernas encontra-se estaticamente estável se a projeção horizontal do seu centro de gravidade se encontra dentro do polígono de apoio.

Matriz jacobiano: matriz de derivadas parciais que descreve a relação linear de velocidades expressa no sistema de coordenadas da base, em função de coordenadas articulares.

Padrões de locomoção: sequência de movimentos dos membros e do corpo do robô que ocorrem durante um ciclo de locomoção.

Polígono de apoio ou suporte: polígono formado pela união dos pontos de apoio cujas pernas do robô se encontram na fase de suporte.

Ponto de momento zero: especifica o ponto em relação o qual a força de reação do contato da perna com o solo, não produz qualquer momento na direção horizontal, isto é, o ponto onde o resultante de forças de contato e as forças de inércia e gravidade são estritamente

opostas. O conceito pressupõe que a área de contato é plana e têm atrito suficientemente elevado para conter o deslizamento das pernas.

Robôs autônomos: robôs com habilidade de produzir e executar suas próprias estratégias de movimento.

Singularidade cinemática: singularidades ocorrem quando não é possível resolver a matriz jacobiano inversa. Singularidades representam configurações nas quais a estabilidade é reduzida (impossível se impor movimento arbitrário do efetuador). Infinitas soluções para cinemática inversa podem existir.

Transformação homogênea: matriz 4x4 usada para descrever a posição e orientação entre dois sistemas de coordenadas no espaço. Descrever o deslocamento de translação e rotação de um vetor, ponto ou sistema de coordenadas no espaço tridimensional.

Tempo de ciclo, T : tempo necessário para completar um ciclo completo de locomoção do robô em um padrão de locomoção periódico.