

Vinicius Giacomazzi

**DESENVOLVIMENTO DE UMA SUSPENSÃO PARA
CADEIRAS DE RODAS UTILIZANDO METODOLOGIA PARA
PROJETO DE MECANISMOS**

Dissertação submetida ao Programa de
Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica da Universidade Federal de
Santa Catarina para a obtenção do Grau
de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Henrique Simas

Dr. Eng.

Coorientador: Daniel Martins

Dr. Eng.

Florianópolis
2018

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária
da UFSC.

Giacomazzi, Vinicius

Desenvolvimento de uma suspensão para cadeiras de rodas utilizando metodologia para projeto de mecanismos / Vinicius Giacomazzi ; orientador, Henrique Simas, coorientador, Daniel Martins, 2018. 112 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2018.

Inclui referências.

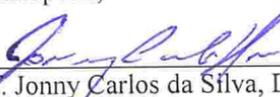
1. Engenharia Mecânica. 2. Engenharia Mecânica. 3. Mecanismos de suspensão. 4. Cadeira de rodas. 5. Síntese de mecanismos. I. Simas, Henrique. II. Martins, Daniel. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

Vinicius Giacomazzi

**DESENVOLVIMENTO DE UMA SUSPENSÃO PARA
CADEIRAS DE RODAS UTILIZANDO METODOLOGIA PARA
PROJETO DE MECANISMOS**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre em Engenharia Mecânica” e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

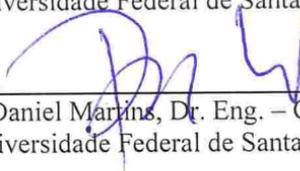
Florianópolis, 14 de outubro de 2018.



Prof. Jonny Carlos da Silva, Dr. Eng.
Coordenador do Curso

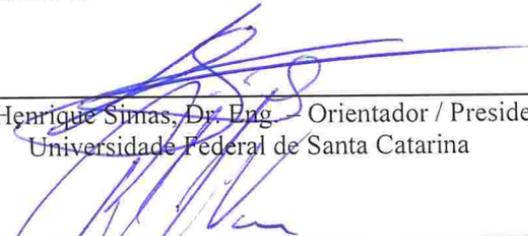


Prof. Henrique Simas, Dr. Eng. – Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

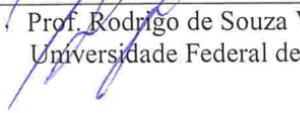


Prof. Daniel Martins, Dr. Eng. – Coorientador
Universidade Federal de Santa Catarina

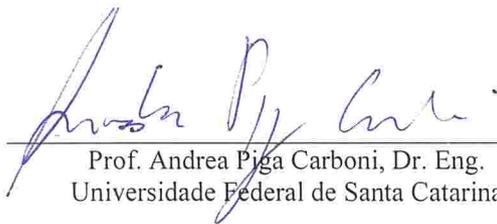
Banca Examinadora:



Prof. Henrique Simas, Dr. Eng. – Orientador / Presidente
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Rodrigo de Souza Vieira, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Andrea Piga Carboni, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina

AGRADECIMENTOS

Primeiramente aos meus pais, pois sem eles não seria possível ter completado esta caminhada. Também pelo apoio e paciência durante todos os momentos. A minha irmã, pela parceria durante todo o tempo, além do incentivo.

A minha namorada Emilli, por acreditar e confiar em mim ao longo dessa caminhada e sempre se mostrar disposta a ajudar em qualquer coisa que fosse necessária.

A todos os membros do laboratório que ajudaram de alguma forma durante a execução da dissertação, em especial aos meus orientadores Professor Henrique Simas e Professor Daniel Martins, pelos conhecimentos repassados, e aos meus colegas de sala Luan, Marcel, Thaís e Vinicius que sempre me auxiliaram quando precisei, além de estarem do meu lado em todas as oportunidades.

Aos meus amigos de Chapecó, que sempre se mostraram preocupados com o andamento do trabalho, em especial a minha amiga Ana Luiza, sempre presente e disposta a me ajudar sempre que precisei.

Finalmente, a CAPES e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFSC, pela oportunidade e apoio.

Everybody is a genius. But if you judge a fish by its ability to climb a tree, it will live its whole life believing that it is stupid.

(Albert Einstein)

RESUMO

A utilização de cadeiras de rodas pode ocasionar o aparecimento de novas lesões ao usuário, quando as estruturas não são desenvolvidas para que o equipamento se desloque por qualquer superfície sem que ele sofra com vibrações excessivas. Quando o organismo está exposto a níveis muito altos, a WBV (Vibração de todo o corpo) pode acarretar no aparecimento de segundas lesões nos cadeirantes (coluna, músculos e nervos). Desta forma, devem-se criar alternativas na fabricação de novos produtos que visem diminuir estes níveis e conseqüentemente melhorar o conforto nas mais diversas superfícies. Desde pequenas mudanças como alterações nas estruturas das almofadas e encostos, como implementações de estruturas de suspensão que auxiliam na queda da vibração. Atualmente, novos produtos têm sido desenvolvidos sendo pensados de forma a aumentar o conforto e possibilitar maior suavidade de movimentos durante o deslocamento. Neste sentido esta dissertação visa trabalhar no mesmo quesito, sendo possível estabelecer os critérios funcionais e estruturais e desenvolver a síntese de mecanismos de suspensão para cadeiras de rodas, para chegar em uma solução economicamente viável de mecanismo para ser utilizado para tal finalidade.

Palavras-chave: Mecanismo de suspensão; Vibração; Conforto; Cadeira de rodas; Projeto de produto.

ABSTRACT

The use of wheelchairs can cause new injuries to the user, when the structures are not designed so that the equipment moves on any surface without suffering with excessive vibrations. When the body is exposed to very high levels, WBV (Whole Body Vibration) can lead to the appearance of second injuries to the wheelchair (spine, muscles and nerves). In this way, we must create alternatives in the manufacture of new products that aim to reduce these levels and consequently improve the comfort in the most diverse surfaces. Since small changes such as changes in the structures of the cushions and backrests, such as implementations of suspension structures that help in the reduction of vibration. Nowadays, new products have been developed being thought of in order to increase the comfort and to allow greater smoothness of movements during the displacement. In this way, this dissertation aims to work on the same subject, being possible to establish the functional and structural criteria and to develop the synthesis of mechanisms of suspension for wheelchairs, to arrive at an economically feasible solution of mechanism to be used for this purpose.

Keywords: Suspension mechanism; Vibration; Comfort; Wheelchair; Product design.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mecanismo paralelo.	34
Figura 2 – Mecanismo paralelo (Liu et al.).....	35
Figura 3 – Mecanismo paralelo (Xu et al.).....	36
Figura 4 – Mecanismo paralelo (Wang e Liu).....	37
Figura 5 – Mecanismo paralelo (Herrero et al.).....	38
Figura 6 – Mecanismo paralelo (Kim et al.).....	39
Figura 7 – <i>METS</i> (Pratt & Miller).....	41
Figura 8 – <i>SHERPA</i> (DLR).....	42
Figura 9 – <i>e-Spider</i> (SWINCAR).....	43
Figura 10 – Funcionamento da suspensão do <i>e-Spider</i>	43
Figura 11 – Funcionamento da suspensão do veículo.....	44
Figura 12 – Posições da suspensão.....	45
Figura 13 – Sistema de suspensão (Maciejewski).....	46
Figura 14 – Sistema de suspensão (Ning).....	47
Figura 15 – Sistema de suspensão (Stein e Můčka).....	48
Figura 16 – Sistema de suspensão (Appala e Ghosal).....	49
Figura 17 – Sistema de suspensão (Nasu e Wada).....	50
Figura 18 – Sistema de suspensão 1 GDL (Eathakota et al.).....	51
Figura 19 – Sistema de suspensão 2 GDL (Eathakota et al.).....	51
Figura 20 – Protótipo Projeto <i>Gölem</i>	55
Figura 21 – Classificação Internacional de Patentes (<i>IPC</i>).....	56
Figura 22 – Pares cinemáticos inferiores.....	59
Figura 23 – Pares cinemáticos superiores.....	59
Figura 24 – Cadeias Cinemáticas.....	60
Figura 25 – Fluxograma de Yan.....	62
Figura 26 – Estrutura de Projeto.....	65
Figura 27 – Patente US5855387.....	67
Figura 28 – Patente US6547206B1.....	67
Figura 29 – Patente US6979010B1.....	68
Figura 30 – Patente US7597163B2.....	69
Figura 31 – Patente US8011680B2.....	69
Figura 32 – Patente US20120013098A1.....	70
Figura 33 – Patente EP2689762A1.....	71
Figura 34 – Patente US4861056.....	71
Figura 35 – Patente US6237889.....	72
Figura 36 – Patente US6796568.....	73
Figura 37 – Patente US6412804B1.....	73
Figura 38 – Cadeira de rodas (Ortomix).....	74
Figura 39 – Cadeira de rodas (<i>Icon</i>).....	75
Figura 40 – Sistema de suspensão (<i>TEKD</i>).....	75
Figura 41 – Cadeira de rodas (<i>Invacare</i>).....	76

Figura 42 – Cadeira de rodas (<i>Everest & Jennings</i>).....	76
Figura 43 – Cadeira de rodas (<i>Colors</i>).....	77
Figura 44 – Cadeira de rodas (<i>Sunrise Medical</i>).....	78
Figura 45 – Rodas (<i>Loopwheels</i>).	78
Figura 46 – Rodas (<i>Softwheel</i>).....	79
Figura 47 – Vista frontal e lateral padrão de medidas de uma cadeira de rodas.	80
Figura 48 – Angulações frontal e lateral da cadeira de rodas.	81
Figura 49 – Esboço inicial da suspensão.	83
Figura 50 – Estrutura metodologia de projeto de mecanismos.	84
Figura 51 – Cadeia cinemática com $M = 2$ e $\nu = 1$	87
Figura 52 – Cadeias cinemáticas (Partição 2) com $M = 2$ e $\nu = 2$	88
Figura 53 – Cadeia cinemática (Partição 2) com $M = 2$ e $\nu = 3$	89
Figura 54 – Cadeias cinemáticas (Partição 3) com $M = 2$ e $\nu = 3$	89
Figura 55 – Cadeias cinemáticas (Partição 4) com $M = 2$ e $\nu = 3$	89
Figura 56 – Cadeias cinemáticas (Partição 5) com $M = 2$ e $\nu = 3$	90
Figura 57 – Inversão da cadeia cinemática com $M = 2$ e $\nu = 1$	91
Figura 58 – Inversões das cadeias cinemáticas com $M = 2$ e $\nu = 2$	91
Figura 59 – Inversões das cadeias cinemáticas com $M = 2$ e $\nu = 3$	92
Figura 60 – Estrutura do amortecedor na cadeia cinemática.....	93
Figura 61 – Mecanismos possíveis para a suspensão.....	94
Figura 62 – Mecanismo vista frontal da suspensão.....	95
Figura 63 – Mecanismo com 1 GDL e amortecimento.	95
Figura 64 – Vista frontal da suspensão proposta.	96
Figura 65 – Vista lateral suspensão proposta.	96
Figura 66 – Vista isométrica suspensão proposta.	97
Figura 67 – Suspensão proposta acoplada a cadeira de rodas.	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Categorias tecnologia assistiva.	24
Tabela 2 – Busca de Patentes.....	58
Tabela 3 – Estruturas Patentes escolhidas.	86
Tabela 4 – Partições com $M = 2$ e $\nu = 1$	87
Tabela 5 – Partições com $M = 2$ e $\nu = 2$	88
Tabela 6 – Partições com $M = 2$ e $\nu = 3$	88

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
DARPA	<i>Defense Advanced Research Projects Agency</i>
DOF	<i>Degree of freedom</i>
GDL	Grau de liberdade
INPI	Instituto Nacional da Propriedade Industrial
IPC	<i>International Patent Classification</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
METS	<i>Multi-mode Extreme Travel Suspension</i>
NBR	Norma Brasileira
RESNA	<i>Rehabilitation Engineering and Assistive Technology Society of North America</i>
RIMRES	<i>Reconfigurable Integrated Multi Robot Exploration System</i>
SCI	<i>Spinal cord injury</i>
WBV	<i>Whole-Body vibration</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

Alfabeto latino:

e	[adm]	Elemento do par cinemático
f_i	[adm]	Grau de liberdade relativo permitido pela junta
j	[adm]	Número de juntas
M	[adm]	Mobilidade
n	[adm]	Número de elos
P	[adm]	Par Prismático
R	[adm]	Par Rotativo
S	[adm]	Par Esférico
U	[adm]	Par Universal

Alfabeto grego:

λ	[adm]	Espaço de trabalho
ν	[adm]	Número de circuitos

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	Apresentação do problema.....	23
1.2	Justificativa	26
1.3	Objetivos.....	28
1.4	Estrutura do trabalho.....	28
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	31
2.1	Problemática das cadeiras de rodas manuais.....	31
2.2	Mecanismos paralelos.....	33
2.3	Sistemas de suspensão existentes para veículos de pequeno e médio porte	40
2.3.1	Multi-mode Extreme Travel Suspension (METS) – Pratt & Miller Enginnering	40
2.3.2	<i>Hybrid wheeled-leg rover – DLR</i>	41
2.3.3	<i>e-Spider – SWINCAR</i>	42
2.3.4	<i>System and methods for a vehicle with an articulating suspension exploration platform with shock dampening – Baumgartner</i>	44
2.4	Análises de sistemas de suspensão diversos	44
2.4.1	Suspensões acopladas ao assento	45
2.4.2	Suspensões desenvolvidas para veículos robóticos	48
2.5	Análises de sistemas de suspensão para cadeiras de rodas	52
2.6	Busca de patentes	55
2.7	Teoria de Mecanismos	58
2.8	Metodologias de Projeto de mecanismos	60
2.8.1	Hartenberg e Denavit.....	60
2.8.2	Hong-Sen Yan	61
2.8.3	Lung-Wen Tsai.....	62
2.8.4	Estevan Hideki Murai.....	63
2.9	Considerações finais do Capítulo	64
3	PROJETO	65
3.1	Descrição do problema	66
3.2	Mecanismos encontrados nas patentes.....	66
3.2.1	<i>Wheel chair with independent suspension (US5855387)</i> ...	66
3.2.2	<i>Seat suspension for wheelchair (US6547206B1)</i>	67
3.2.3	<i>Sport utility wheelchair (US6979010B1)</i>	68
3.2.4	<i>Obstacle traversing wheelchair (US7597163B2)</i>	68
3.2.5	<i>Wheelchair suspension system (US8011680B2)</i>	69

3.2.6	<i>Wheelchair modular rear suspension (US20120013098A1)</i>	70
3.2.7	<i>Moyen de transport tout terrain pour personnes à motricité déficiente (EP2689762A1)</i>	70
3.2.8	<i>Folding wheelchair with improved frame and suspension system (US4861056)</i>	71
3.2.9	<i>Seat suspension assembly (US6237889)</i>	72
3.2.10	<i>Suspension system for a wheelchair (US6796568)</i>	72
3.2.11	<i>Wheelchair with improved suspension (US6412804B1)</i>	73
3.3	Pesquisa de mercado	74
3.3.1	Modelo - Ortomix	74
3.3.2	Modelo – Icon	74
3.3.3	Modelo – TEKD	75
3.3.4	Modelo – Invacare	75
3.3.5	Modelo – Everest & Jennings	76
3.3.6	Modelo – Colors	77
3.3.7	Modelo – Sunrise Medical	77
3.3.8	Modelo – Loopwheels	78
3.3.9	Modelo – Softwheel	79
3.4	Considerações de Projeto	79
3.4.1	Dimensionamento	80
3.4.2	Peso	80
3.4.3	Material	80
3.4.4	Funções	81
3.4.5	Mobilidades	81
3.4.6	Aplicabilidade	81
3.5	Considerações do Capítulo	82
4	SÍNTESE DE MECANISMOS	83
4.1	Conceito do mecanismo	83
4.2	Projeto do mecanismo	84
4.2.1	Critérios funcionais	85
4.2.2	Critérios estruturais	85
4.2.3	Síntese do Número	86
4.2.4	Síntese do Tipo	92
4.3	Considerações do Capítulo	98
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	100
5.1	Conclusões	100
5.2	Sugestões para trabalhos futuros	101
	REFERÊNCIAS	102

APÊNDICE A – Geração de grafos $M = 2$ e $\nu = 1$	109
APÊNDICE B – Geração de grafos $M = 2$ e $\nu = 2$.....	110
APÊNDICE C – Geração de grafos $M = 2$ e $\nu = 3$	111

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo é apresentada a contextualização dos problemas que esta dissertação visa solucionar. Ainda, serão apresentadas as justificativas, objetivos e como será estruturado o trabalho.

1.1 Apresentação do problema

De acordo com dados obtidos pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2015), existem cerca de 13 milhões de portadores de algum tipo de deficiência no Brasil, o que corresponde à aproximadamente 7% da população. Destes, uma parcela possui algum tipo de deficiência motora, o que acarreta a necessidade de algum meio auxiliar para locomoção, como por exemplo a cadeira de rodas. O equipamento é utilizado seja para estudo, trabalho, esporte, ou ainda apenas movimentação pelos mais diversos terrenos.

Virtuoso (2016) mostra que um dos grandes problemas encontrados por essa parcela de cadeirantes no Brasil, é o fato de as cidades não terem ainda se adequado em sua totalidade para garantir segurança e facilidade de acesso a qualquer lugar. Os problemas não conseguem ser solucionados pelos mais diversos motivos, sendo os principais: falta de planejamento, falta de recurso e descaso. A falta de um projeto mais abrangente caminhando para uma cidade mais inclusiva e segura, que leve em consideração todos os recursos referentes aos direitos humanos, assegura que a situação não se altere.

Depender somente da adequação nas cidades pode tornar o processo de inclusão social muito lento. Deste modo, devem-se adotar medidas com diferentes abordagens, agilizando a busca por resultados satisfatórios. O uso de tecnologia assistiva é uma forma de abordar o problema de maneira mais prática, pois apresenta potencial para facilitar a utilização de espaços (domésticos e de uso comum) por pessoas com necessidades especiais (MENDES; TIBURCIO, 2016).

O Comitê de Ajudas Técnicas (2009) define tecnologia assistiva como uma área do conhecimento que engloba quaisquer tipos de produtos, recursos, metodologias, estratégias, práticas e serviços que objetivam promover a funcionalidade, relacionada à atividade e participação de pessoas com deficiência, incapacidades ou com mobilidade reduzida, visando sua autonomia, independência, qualidade de vida e inclusão social. As tecnologias assistivas são divididas em 11

categorias, de modo a organizar a área de conhecimento, para melhor atender ao usuário final. A Tabela 1 mostra detalhes das classificações.

Tabela 1 – Categorias tecnologia assistiva.

Divisão – Tecnologia assistiva	
Categoria	Características
1 – Auxílio para a vida diária	Materiais e produtos para auxílio em tarefas rotineiras tais como comer, cozinhar, vestir-se, tomar banho e executar necessidades pessoais, manutenção da casa etc.
2 – Comunicação aumentativa (suplementar) e alternativa	Recursos, eletrônicos ou não, que permitem a comunicação expressiva e receptiva das pessoas sem a fala ou com limitações da mesma. São muito utilizadas as pranchas de comunicação com os símbolos PCS ou <i>Bliss</i> , além de vocalizadores e softwares dedicados para este fim.
3 – Recursos de acessibilidade ao computador	Equipamentos de entrada e saída (síntese de voz, Braille), auxílios alternativos de acesso (ponteiras de cabeça, de luz), teclados modificados ou alternativos, acionadores, softwares especiais (de reconhecimento de voz, etc.), que permitem as pessoas com deficiência a usarem o computador.
4 – Sistemas de controle de ambiente	Sistemas eletrônicos que permitem as pessoas com limitações moto-locomotoras, controlar remotamente aparelhos eletroeletrônicos, sistemas de segurança, entre outros, localizados em seu quarto, sala, escritório, casa e arredores.
5 – Projetos arquitetônicos para acessibilidade	Adaptações estruturais e reformas na casa e/ou ambiente de trabalho, através de rampas, elevadores, adaptações em banheiros entre outras, que retiram ou reduzem as barreiras físicas, facilitando a locomoção da pessoa com deficiência.

6 – Órteses e próteses	Troca ou ajuste de partes do corpo, faltantes ou de funcionamento comprometido, por membros artificiais ou outros recursos ortopédicos (talas, apoios etc.). Inclui-se os protéticos para auxiliar nos déficits ou limitações cognitivas, como os gravadores de fita magnética ou digital que funcionam como lembretes instantâneos.
7 – Adequação Postural	Adaptações para cadeira de rodas ou outro sistema de sentar visando o conforto e distribuição adequada da pressão na superfície da pele (almofadas especiais, assentos e encostos anatômicos), bem como posicionadores e contentores que propiciam maior estabilidade e postura adequada do corpo através do suporte e posicionamento de tronco, cabeça e membros.
8 – Auxílios de mobilidade	Cadeiras de rodas manuais e motorizadas, bases móveis, andadores, <i>scooters</i> de 3 rodas e qualquer outro veículo utilizado na melhoria da mobilidade pessoal.
9 – Auxílios para cegos ou com visão subnormal	Auxílios para grupos específicos que inclui lupas e lentes, Braille para equipamentos com síntese de voz, grandes telas de impressão, sistema de TV com aumento para leitura de documentos, publicações etc.
10 – Auxílios para surdos ou com déficit auditivo	Auxílios que inclui vários equipamentos (infravermelho, FM), aparelhos para surdez, telefones com teclado - teletipo (TTY), sistemas com alerta tátil-visual, entre outros.
11 – Adaptações em veículos	Acessórios e adaptações que possibilitam a condução do veículo, elevadores para cadeiras de rodas, camionetas modificadas e outros veículos automotores usados no transporte pessoal.

Fonte: adaptado de (SARTORETTO e BERSCH, 2014).

A presente pesquisa pode se encaixar nas categorias 7 e 8, pois será desenvolvido um produto que se adapta a cadeira de rodas visando maior conforto, melhor distribuição de pressão ao corpo do usuário, além

de tornar a tarefa de locomoção mais leve. Para tal, será realizada uma síntese de mecanismos para que se possa chegar na solução ideal para o problema. Existem inúmeras metodologias para projeto de mecanismos, como exemplo temos aquelas baseadas em enumeração (HARTENBERG e DENAVIT, 1964; YAN, 1999; TSAI, 2000). Estas metodologias podem ser divididas em etapas: listar requisitos de projeto e estruturais, gerar mecanismos, selecionar o(s) viável(is) e finalmente realizar o projeto de maneira detalhada (MURAI, 2013).

No presente trabalho será desenvolvida uma estrutura de suspensão, que pode ser utilizada em veículos de pequeno porte, além da aplicação principal para este trabalho, que é em uma cadeira de rodas manual. Outro ponto da pesquisa, é uma listagem de critérios estruturais e funcionais para uma síntese de mecanismos que podem ser utilizados para tal função. Finalmente será escolhido um mecanismo ideal para a tarefa, levando em consideração os requisitos de projeto pré-estabelecidos.

1.2 Justificativa

Esta pesquisa foi desenvolvida pela necessidade de diminuição dos níveis de impacto sentidos pelo condutor em veículos de pequeno porte, com foco principal para cadeiras de rodas manuais. Menor o nível de impacto, maior o conforto do condutor e maior suavidade de movimento irá possuir o equipamento em questão. O problema mais grave que esta dissertação visa ajudar a resolver é o risco de aparecimento de incapacidades secundárias ao usuário de cadeira de rodas.

Cooper *et al.* (2003) explicam que o desenvolvimento de cadeiras de rodas está em constante avanço e que, recentemente, o conforto é prioridade na fabricação de novos equipamentos, para que o condutor tenha risco reduzido de desenvolvimento de incapacidades secundárias ao utilizá-los. Os riscos ocorrem pelo simples movimento de deslocar a cadeira, levantar-se do equipamento para outro local e principalmente pela exposição a vibração durante o deslocamento. Para que se tenha diminuição na vibração, as soluções que se mostram mais eficazes são o desenvolvimento de novos tipos de almofadas para encosto, suportes traseiros diferenciados e ainda conjuntos de suspensão mais elaborados.

Wolf *et al.* (2004) descreveram que a exposição prolongada a vibrações pode causar respostas fisiológicas prejudiciais ao corpo humano, podendo resultar em deformidades da coluna vertebral, hérnia de disco e lombalgia. Então, propuseram um estudo, envolvendo 32

participantes, no qual foram testadas e comparadas as vibrações de corpo inteiro potencialmente prejudiciais sentidas com a alteração nas almofadas utilizadas em cadeiras de rodas diversas. Os testes envolveram deslocamento por diversos obstáculos, incluindo lombadas e descida de meio-fio.

Os resultados de Wolf *et al.* (2004) mostraram que, dos modelos selecionados e testados, os assentos mais complexos causavam menores níveis de desconforto aos cadeirantes. Embora a diminuição não tenha atingido valores satisfatórios, concluíram que mais pesquisas devem ser feitas, sendo desenvolvidos projetos mais completos de sistemas que atenuem as vibrações sentidas pelos usuários.

Maeda *et al.* (2003) aplicaram um questionário a 33 usuários de cadeiras de rodas (com idades que variavam entre 7 e 65 anos, com diferentes deficiências) a fim de identificar quais as principais queixas com relação a vibração sentidas durante testes simulando deslocamento em diferentes superfícies. Constataram então que os diferentes níveis de vibração afetaram o conforto psicológico, além de serem sentidos desconfortos na região do pescoço, lombar e nádegas. Outro ponto visto foi que os efeitos das mudanças na frequência são importantes informações a serem estudadas pela engenharia para serem melhoradas, e ainda que a vibração vertical foi a mais intensa para o corpo dos participantes.

Sendo assim, Maeda *et al.* (2003) puderam concluir que devemos reduzir a transmissibilidade de vibração no assento do equipamento, com projetos envolvendo rigidez e amortecimento ao conjunto das cadeiras de rodas.

Hischke e Reiser (2018) desenvolveram um estudo que teve o objetivo de comparar choque e vibração sentidos por usuários de uma cadeira de rodas rígida manual com resultados publicados em outros trabalhos, a fim de determinar a significância da diminuição da exposição aos choques com a inclusão de um sistema de suspensão traseira comum encontrado no mercado. Os participantes eram 10 pessoas saudáveis, não cadeirantes. Os testes envolveram passagem por quatro obstáculos diferentes: passagem por uma soleira de porta, passagem por piso especial com marcações para deficientes, subida em obstáculo de 2cm e descida no mesmo obstáculo.

Os resultados de Hischke e Reiser (2018) revelaram que o sistema de suspensão de rodas traseira disponível fornece algum nível de supressão de choque e vibração na estrutura. Os níveis também são sentidos em um modelo de cadeira disponível com suspensão de fábrica

existente no mercado e mostrado no trabalho. Assim, para usuários de cadeiras de rodas com controle postural limitado, o uso de estruturas de suspensão de roda traseira pode melhorar significativamente o conforto ao locomoverem-se por superfícies diversas.

1.3 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é o desenvolvimento de um mecanismo de suspensão a ser acoplado a veículos de pequeno porte, para que seja reduzido o balanço natural dos equipamentos ao transitar por superfícies irregulares. Para que o objetivo principal possa ser alcançado, foram definidos ainda alguns objetivos específicos que este trabalho irá contemplar:

- Fazer um mapeamento completo através de pesquisa de mercado, de modo a encontrar e analisar produtos existentes.
- Realizar pesquisa de patentes, para que sejam verificados os mecanismos existentes, que servirão como base para a criação do mecanismo proposto por este trabalho.
- Indicar as diretrizes do projeto, para que o mecanismo proposto atenda aos requisitos pré-estabelecidos.
- Definir os critérios funcionais do mecanismo com base nas diretrizes de projeto.
- Estabelecer os critérios de estrutura para que seja realizada a síntese de mecanismos.
- Realizar a síntese do número e do tipo para encontrar soluções possíveis.

1.4 Estrutura do trabalho

O presente trabalho está dividido em diversos capítulos, a seguir será descrito um breve resumo sobre o que cada um deles irá abordar.

No Capítulo 1 é apresentada a problemática abordada na pesquisa, bem como os pontos que justificam o desenvolvimento do mecanismo em questão, além dos objetivos que a dissertação visa concluir.

O Capítulo 2 contempla a revisão bibliográfica de todo o material que possa colaborar para a criação do mecanismo do objetivo deste estudo, contemplando: mecanismos paralelos, mecanismos de suspensão e ainda os específicos, utilizados em cadeiras de rodas. Critérios utilizados na busca de patentes e ainda é feita a apresentação de alguns

conceitos e ferramentas que são indispensáveis no desenvolvimento de mecanismos.

No Capítulo 3 são descritas as etapas da metodologia de projeto relevantes a este estudo. Metodologia esta desenvolvida pela UFSC, que se chama Projeto de Desenvolvimento Integrado de Produtos – PRODIP (BACK *et al.*, 2008). Ainda é feita uma análise mais detalhada das patentes que se encaixam ao problema proposto e são mostradas suas estruturas e mobilidades.

O Capítulo 4 descreve os resultados encontrados na pesquisa, com detalhamentos que contemplam o conceito do produto final, bem como as análises e sínteses para encontrar mecanismo ideal.

Finalmente, no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões obtidas com a realização da dissertação, além de perspectivas de trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste Capítulo é feita uma revisão que engloba o estado da arte no desenvolvimento de mecanismos de suspensão para veículos de pequeno porte, além de suspensões desenvolvidas especialmente para cadeiras de rodas. Para tal, são analisados alguns trabalhos que abordam mecanismos complacentes, mecanismos paralelos, ferramentas para desenvolvimento de projeto de produtos e técnicas para desenvolvimento e análise de mecanismos. Por fim é listado um conjunto de considerações sobre as soluções existentes, para que se possa ter uma boa justificativa e embasamento para o desenvolvimento do produto proposto por esta pesquisa.

2.1 Problemática das cadeiras de rodas manuais

Garcia-Mendez *et al.* (2013) explicam que existe uma nomenclatura para a vibração transmitida pelas superfícies de apoio ao corpo humano. A *WBV* (do inglês “*Whole-body vibration*”) é a vibração de corpo inteiro e há evidências de que a exposição quando se está sentado oferece sérios riscos para distúrbios da coluna vertebral, fadiga muscular excessiva e ainda danos aos nervos, podendo apresentar ainda condições para desenvolvimento de lombalgia, se a exposição for cumulativa. Muitos fatores provocam a *WBV*, incluindo posição postural e amplitude e frequência que o corpo está exposto à certos tipos de vibração.

A Organização Internacional de Padronização, através da ISO 2631 (1978), desenvolveu diretrizes que avaliam os efeitos da amplitude e duração da *WBV* e estabeleceu limites aceitáveis em diferentes posições corporais. Dos três tipos de exposição humana à vibração descritos pela norma, dois se encaixam quando estamos pensando em usuários de cadeiras de rodas:

- Vibrações transmitidas ao corpo como um todo através de superfícies de sustentação – Neste caso seria a vibração sentida pelas nádegas e costas de um homem sentado.
- Vibrações aplicadas a partes específicas do corpo, como cabeça e membros – Neste caso, a vibração sentida pelos pés e pernas através do contato com os apoios da cadeira.

DiGiovine *et al.* (2000b) mostram que não existe um padrão de limite de vibração proposto para a fabricação de cadeiras de rodas (o único controle existente é o limite para vibração humana, proveniente da ISO 2631). Os únicos quesitos que devem ser levados em consideração

são a durabilidade, a estabilidade e ainda a eficácia do equipamento, que seguem padrões de certificação *ANSI/RESNA*. Porém os fabricantes devem reconhecer aspectos do design que causem desconforto, a fim de proporcionar ao usuário uma mobilidade adequada.

DiGiovine *et al.* (2000a) propuseram um estudo que teve como objetivo comparar quatro almofadas, com base na sua capacidade de minimizar a transmissão de vibração da cadeira de rodas para o indivíduo. Determinar a almofada que minimiza as vibrações fornece aos médicos informações adicionais ao recomendar a mais adequada. Os resultados revelam que a adição desses acessórios já proporciona redução na vibração transferida do equipamento ao usuário.

VanSickle *et al.* (2001) desenvolvem um estudo que aplica os padrões de vibração para cadeirantes, com o objetivo de atingir três objetivos principais: o desenvolvimento de instrumentação e técnicas necessárias para medir a aceleração dinâmica, a determinação de potenciais problemas de saúde para cadeirantes, por meio de técnicas analíticas atuais e a determinação de quão bem as técnicas de análise de aceleração se aplicam aos usuários de cadeira de rodas, com base em seus padrões de uso. Para atingir esses objetivos, o estudo foi projetado com múltiplos componentes e duas situações de teste foram planejadas. Um teste foi a operação de uma cadeira de rodas instrumentada sobre um curso de deslocamento simulado e o outro foi a operação da mesma cadeira de rodas instrumentada durante as atividades diárias normais dos sujeitos de teste. Os resultados mostraram que a vibração pode ser um fator contribuinte para a fadiga.

Cooper *et al.* (2003) então propõem um estudo para análise de diferença de vibração entre modelos de cadeiras de rodas que possuem conjuntos traseiros de suspensão e cadeiras rígidas comuns, com objetivo de determinar se as suspensões atenuaram os choques e vibrações induzidos nos apoios de pés e assentos dos equipamentos. Para tal, foram utilizados seis modelos diferentes, sendo três contendo as suspensões e outras três sem. Os resultados encontrados mostraram que na maioria das frequências testadas, diferenças significativas foram encontradas, tanto na vibração dos pés, quanto na vibração do assento dos equipamentos.

Requejo *et al.* (2008) desenvolveram um estudo um pouco mais específico, para usuários que possuem lesão da medula espinhal (SCI). Este determinou as forças transmitidas a partir do assento e as acelerações experimentadas por cadeirantes que foram expostas a repetidas colisões enquanto sentadas nas cadeiras com quadros rígidos e com suspensões traseiras. O objetivo principal foi desenvolver uma avaliação objetiva da

reposta do corpo humano a choques e vibrações e estabelecer a relação dessa resposta com o conforto da cadeira de rodas e a qualidade da viagem em usuários com SCI. Os resultados mostraram que a suspensão reduziu a força e as acelerações experimentadas pelos usuários de cadeira de rodas manual e pode melhorar o conforto em velocidades mais altas, especialmente para usuários sem inervações do tronco muscular. Ainda foi determinado que a exposição a vibração pode depender da configuração da suspensão, da inervação do músculo de tronco e da velocidade, e que minimizar as forças transmitidas ao usuário é importante para a qualidade da condução.

Feito o levantamento dos principais estudos que comprovam que a adição de elementos (almofadas e sistemas de suspensão) colabora com a diminuição da vibração sofrida pelos equipamentos, o próximo passo é mostrar análises e métodos disponíveis na literatura para síntese de mecanismos paralelos (pela semelhança estrutural com o resultado proposto pelo trabalho), que também irão colaborar com o resultado esperado com esta dissertação.

2.2 Mecanismos paralelos

Neste item serão descritas algumas estruturas de mecanismos paralelos existentes na literatura, além de métodos utilizados para a síntese destes mecanismos. O objetivo é analisar as estruturas e ter uma maior base de conhecimento para que se possa chegar na melhor ideia possível para o produto proposto por este trabalho.

Hu *et al.* (2012) descreve um mecanismo paralelo como é um sistema mecânico que usa várias cadeias seriais controladas por computador para suportar uma única plataforma, ou efetuator final. A base estrutural dos mecanismos é relativamente simples e pode ser visualizada na Figura 1.

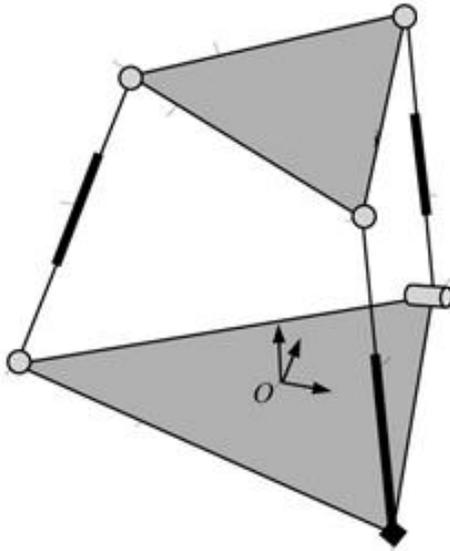


Figura 1 – Mecanismo paralelo.
 Fonte: adaptado de (HU *et al.*, 2012).

Jin *et al.* (2017) desenvolvem a análise e síntese do tipo de mecanismos do tipo 2T2R e 3T2R, além da criação de novos mecanismos do mesmo tipo visando o alcance de ângulos rotacionais maiores. A estrutura contempla duas plataformas móveis articuladas compostas por juntas de revoluções. Um paralelogramo comum e um paralelogramo de evolução que são utilizados para orientar os eixos de rotação são projetados e analisados.

Os resultados de Jin *et al.* (2017) mostram que, com a análise do espaço de trabalho, os mecanismos propostos possuem rotações maiores e quase alcançam 180° . Os manipuladores possuem diversas aplicações: robôs industriais, simuladores de movimento, além de quaisquer outros dispositivos que exigem alto desempenho rotacional.

Xu *et al.* (2015) propuseram um método para análise de força de mecanismos com mobilidade reduzida. Este método baseia-se principalmente nas heliforças de restrição aplicadas à plataforma móvel pelos membros de suporte e, em seguida, leva em conta a relação de mapeamento entre estas heliforças e as deformações dos membros de suporte. A análise é feita seguindo algumas etapas:

- Os mecanismos paralelos são subdivididos em grupos de acordo com as propriedades elásticas.
- Então são introduzidas e definidas as matrizes de rigidez correspondentes.
- Ainda são estabelecidas as expressões analíticas para solução dos sistemas.
- Finalmente, com a utilização do software de simulação *Adams*, o método é testado e os resultados são mostrados.

Os resultados da simulação de Xu *et al.* (2015) mostram que os resultados teóricos condizem com o esperado. Ao utilizar este método, cada força atuada e as reações conjuntas podem ser calculadas rapidamente. Também pode fornecer referências para o projeto estrutural e otimização desse tipo de mecanismo. Deste modo, pode-se dizer que o método apresentado é consistente e obteve resultados corretos na análise de força em mecanismos paralelos com mobilidade reduzida.

Liu *et al.* (2001) tem em sua proposta um novo manipulador paralelo com três graus de liberdade, sendo dois graus translacionais e um de orientação. O manipulador consiste em uma base, uma plataforma móvel e três pernas de conexão. A Figura 2 ilustra o manipulador proposto.

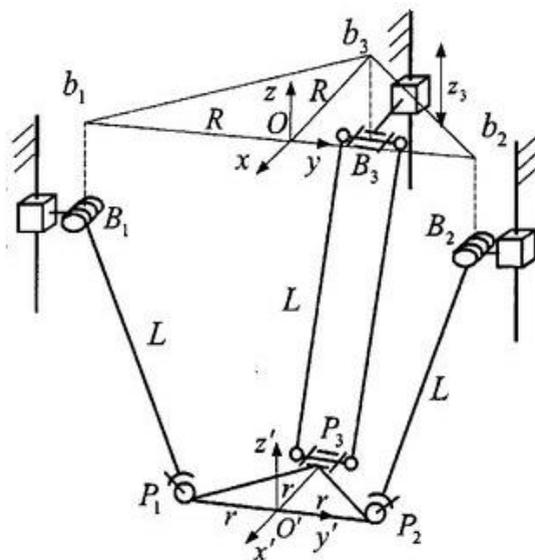


Figura 2 – Mecanismo paralelo (Liu *et al.*).
Fonte: adaptado de (LIU *et al.*, 2001).

Então, Liu *et al.* (2001) mostram os cálculos da cinemática direta e também a inversa do manipulador, além da análise de singularidade. Os resultados mostram que a cinemática inversa pode atingir oito soluções e a cinemática direta pode atingir quatro. O manipulador tem aplicação em robôs industriais, simuladores, micro manipuladores e ferramentas para máquinas paralelas.

Xu *et al.* (2018) tem em sua proposta de um novo manipulador paralelo 2R1T, com 12 *DOF*. O mecanismo não possui nenhuma junta esférica e pode ser acionado por atuadores lineares fixos. São calculadas as restrições redundantes e a mobilidade, depois calculada a cinemática inversa do manipulador e finalmente a análise de singularidade. Ainda é aplicada otimização para melhoria nos parâmetros de design do mecanismo. A Figura 3 mostra o mecanismo desenvolvido.

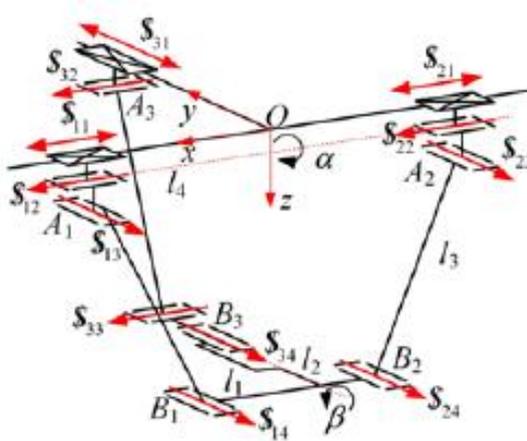


Figura 3 – Mecanismo paralelo (Xu *et al.*).

Fonte: adaptado de (XU *et al.*, 2001).

Os resultados de Xu *et al.* (2018) mostram que os atuadores fixos podem levar a alta precisão e rigidez, além de proporcionar boas respostas dinâmicas. Com a cinemática inversa simples, a modelagem dinâmica e o controle são beneficiados. A aplicabilidade do manipulador é boa quando alta rigidez, destreza e precisão são necessárias.

Já a proposta de Wang e Liu (2003) consiste em um manipulador paralelo com três graus de liberdade, sendo dois de translação e um de rotação. O mecanismo consiste em uma base, uma plataforma móvel e três pernas de conexão. A equação de velocidade do manipulador é dada,

além de serem apresentados três tipos de singularidades. Ainda, a área de trabalho é analisada e finalmente, o índice de mobilidade é definido. A Figura 4 mostra o mecanismo em questão.

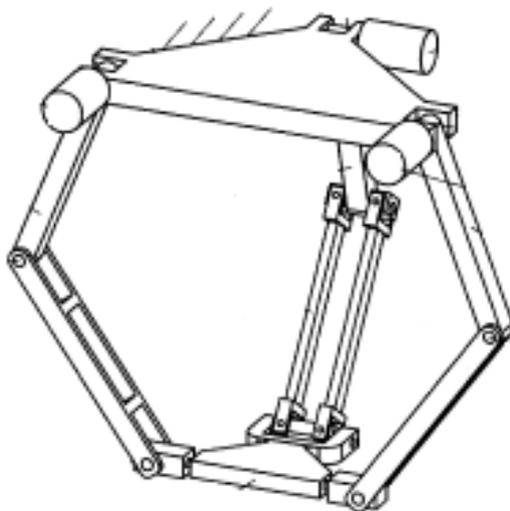


Figura 4 – Mecanismo paralelo (Wang e Liu).
Fonte: adaptado de (WANG e LIU, 2003).

Os resultados da proposta de Wang e Liu (2003) mostram que o manipulador possui alta mobilidade. As vantagens do manipulador paralelo são: somente juntas de revoluções são usadas e combinação de graus de liberdade translacionais e rotacionais espaciais em um manipulador paralelo espacial. Assim, pode ser amplamente aplicado em robôs industriais, simuladores, micro manipuladores e ferramentas para mecanismos paralelos.

Herrero *et al.* (2018) propõem uma análise de um mecanismo 2PRU (conjunto contendo junta prismática, de revolução e universal) – 1PRS (conjunto contendo junta prismática, de revolução e esférica) com relação a mecanismos 3PRS e suas vantagens. É resolvida a cinemática do sistema de um mecanismo geral, além de algumas singularidades e a própria dinâmica. Depois as análises são feitas em um caso particular utilizado para fins de teste de peças automotivas. A Figura 5 traz o mecanismo proposto com detalhes.

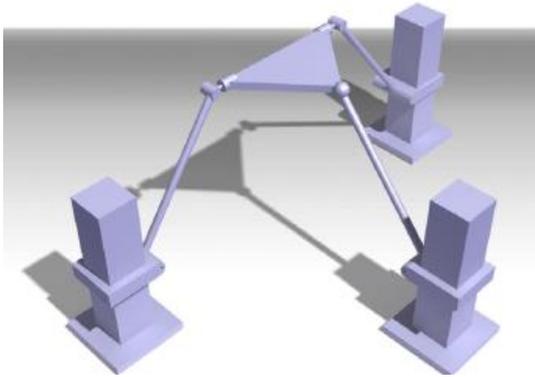


Figura 5 – Mecanismo paralelo (Herrero *et al.*).
Fonte: (HERRERO *et al.*, 2018).

Herrero *et al.* (2018) resolveram o problema dinâmico inverso para as três trajetórias apresentadas e ainda foram obtidas as forças de reação nas guias lineares e a potência requerida pelos motores durante as três trajetórias. Somente foi analisado o caso particular da utilização do mecanismo, uma máquina de teste de peças de automóvel. Os resultados mostram que com as análises do caso particular, todas as singularidades são resolvidas e as restrições nos guias e motores são cumpridas.

Kim *et al.* (2018) tem em seu trabalho o desenvolvimento de um dispositivo do tipo *Schönflies Motion* com 4 *DOF* e atuação redundante. São feitas a análise da mobilidade, modelagem cinemática, análise das singularidades e otimização, e é implementado um protótipo com dois modos operacionais (compensação da gravidade e da inércia linear). O dispositivo é composto de um submódulo paralelo acionado de forma redundante que possui movimento de saída translacional com 3 *DOF*, um membro de pantógrafo que assume o papel de fornecer movimento de saída rotacional de 1 *DOF* e uma junta de revolução permitindo o movimento relativo entre eles. O mecanismo descrito pode ser visto na Figura 6.

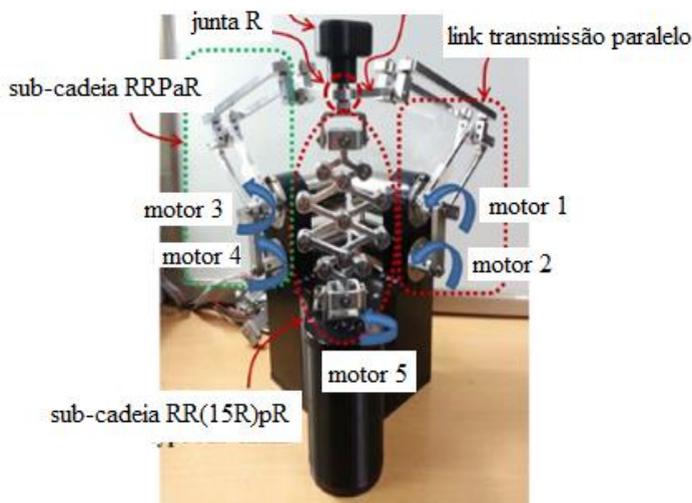


Figura 6 – Mecanismo paralelo (Kim *et al.*).
 Fonte: adaptado de (KIM *et al.*, 2018).

Os resultados encontrados por Kim *et al.* (2018) mostram que o dispositivo possui mínimo atrito, bom desempenho com a compensação da gravidade e da inércia, que são suficientes para se dizer que podem ser aplicados em procedimentos médicos, cirurgias assistidas, etc.

Fan *et al.* (2013) demonstram em seu trabalho a síntese de novos manipuladores do tipo 2T2R, 1T2R e 2R. Dois são os métodos utilizados para a obtenção dos manipuladores:

- *Configuration evolution*, que é uma abordagem direta e prática para a síntese do tipo de mecanismos. Sua ideia é que, com base em um protótipo de mecanismo paralelo, um segundo desejável pode ser adquirido por muitos tipos de métodos, como alterar o número de membros, variar o número e o tipo de juntas ativas, transformar o *layout* da base, entre outros. Assim, o número de graus de liberdade do mecanismo permanece constante no processo de evolução da configuração tradicional.
- Teoria de Grupos de Lie.

Fan *et al.* (2013) obtiveram como resultados que com a combinação dos dois métodos, a abordagem fica mais simples e prática. Os mecanismos obtidos têm ampla perspectiva de aplicação, por exemplo, 2T2R pode ser utilizado para ferramenta paralela de quatro eixos e peneira vibratória de colheitadeira. Já o 1T2R, pode ser utilizado

para máquina de medição coordenada, ferramenta de eixo, simuladores de movimento. E ainda o 2R, para rastreamento de equipamentos, tais como radar e míssil.

Finalmente, outra abordagem para a síntese do tipo de manipuladores paralelos translacionais desacoplados com 3 *DOF* é mostrada no trabalho de Zhang *et al.* (2018), baseada na teoria de helicoides. Os princípios de seleção das juntas acionadas que acionam a plataforma para transladar ao longo da direção determinada são explorados por meio dos diferentes tipos de heliforças, de passo zero ou de passo infinito. Dois manipuladores são tomados como exemplos para verificar a exatidão e viabilidade do método de síntese de tipo apresentado. Os mecanismos têm desempenhos totalmente isotrópicos quando as juntas acionadas são pares prismáticos ou cilíndricos.

Feita a análise das estruturas de mecanismos paralelos e dos métodos utilizados para a síntese, no próximo item temos o estado da arte no quesito suspensões para veículos de pequeno e médio portes, que podem servir de auxílio para o desenvolvimento do produto proposto por este trabalho.

2.3 Sistemas de suspensão existentes para veículos de pequeno e médio porte

Neste item serão mostrados conjuntos de suspensão com controles de sistema ativos e passivos, que representam o que existe de mais avançado tecnologicamente na atualidade, sendo assim, servem como uma boa base para a possibilidade de desenvolvimento de novos produtos para o mercado, como é o caso deste estudo.

2.3.1 Multi-mode Extreme Travel Suspension (METS) – Pratt & Miller Enginnering

Este protótipo representa o que há de mais avançado em termos de suspensão veicular. Contratado em 2016 pela Agência de Projetos de Pesquisa Avançada de Defesa dos EUA (*DARPA*), o *METS* tem como objetivo permitir viagens em alta velocidade em terrenos acidentados, mantendo o veículo na posição vertical e minimizando o desconforto dos ocupantes. São dois sistemas de suspensão, o primeiro, de curta distância, projetada para oferecer manuseio seguro e previsível. Já a segunda, com alcance de 42 polegadas para cima e 30 polegadas para baixo, funciona de modo independente nas quatro rodas, permitindo que o veículo

mantenha o assento em posição horizontal passando por qualquer superfície, superando obstáculos e terrenos mais agressivos. A Figura 7 mostra em detalhes uma das posições possíveis do veículo em movimento.



Figura 7 – METS (Pratt & Miller).

Fonte: <https://defence-blog.com/army/pratt-miller-developed-a-prototype-of-future-combat-vehicle.html>.

2.3.2 Hybrid wheeled-leg rover – DLR

Este foi um projeto desenvolvido pelo governo alemão em parceria com seu centro aeroespacial, com duração de quatro anos. Roehr *et al.* (2013) mostram que o objetivo do projeto foi o desenvolvimento de tecnologias básicas para sistemas robóticos reconfiguráveis modulares para suportar a execução eficiente e robusta de tarefas complexas em áreas de difícil acesso. O foco foi um conceito de sistema altamente modular que consistia em módulos para diferentes funções, ou seja, locomoção, fornecimento de energia, registro de dados, autonomia e navegação. O veículo, desenvolvido no projeto *RIMRES (Reconfigurable Integrated Multi Robot Exploration System)* oferece não apenas uma locomoção eficiente em terrenos moderadamente não-estruturados, mas, como resultado do sistema de suspensão ativa, proporciona maior mobilidade para se libertar se ficar preso e reagir de forma flexível a circunstâncias imprevistas. A Figura 8 mostra o veículo em questão, com detalhe na estrutura da suspensão.



Figura 8 – *SHERPA (DLR)*.
Fonte: (ROEHR *et al.*, 2013).

2.3.3 *e-Spider – SWINCAR*

Rambaud (2017) explica que este é um projeto que combina alto desempenho e facilidade na condução. O veículo é elétrico e possui tração nas quatro rodas, podendo operar em uma variedade muito grande de terrenos. Contempla um inovador sistema de pêndulo, que faz com que o centro de gravidade do conjunto seja baixo, possibilitando sua inclinação quando o veículo gira e sobe e desce declives. São três modelos existentes, o primeiro é para um único usuário, o segundo contempla um assento extra para um segundo usuário e o terceiro foi desenvolvido para uso exclusivo de pessoas com pouca mobilidade, onde foi adicionado um sistema que facilita a entrada/saída do cadeirante ao veículo. A Figura 9 mostra o modelo em questão.



Figura 9 – *e-Spider* (SWINCAR).

Fonte: <https://www.swincar.net/details-swincar+e-spider+model-20.html>.

Com seu sistema de suspensão independente nas quatro rodas, em conjunto com o pêndulo, possibilita que o assento se mantenha na horizontal enquanto os pneus atravessam diversos obstáculos. A Figura 10 mostra em detalhes o funcionamento do sistema.

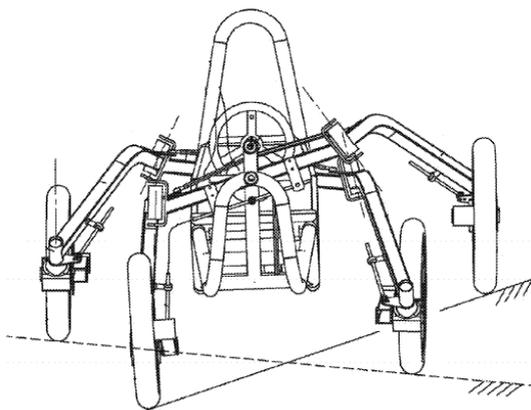


Figura 10 – Funcionamento da suspensão do *e-Spider*.

Fonte: adaptado de (RAMBAUD, 2017).

2.3.4 *System and methods for a vehicle with an articulating suspension exploration platform with shock dampening – Baumgartner*

Estrutura desenvolvida para um veículo com plataforma de exploração com sistema passivo de suspensão articulada com amortecimento. Sistema possui uma barra longitudinal que possibilita que os movimentos do lado esquerdo e direito da estrutura sejam independentes, de acordo com o obstáculo encontrado. O amortecedor converte a energia cinética dos choques em outras formas de energia, como o calor, e as dissipa. A estrutura central se mantém o mais horizontal possível de acordo com o movimento das rodas. A Figura 11 mostra a referida estrutura.

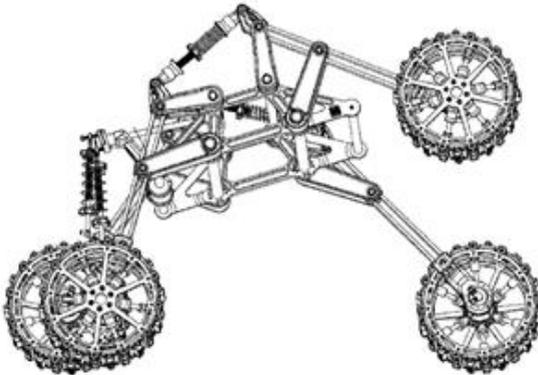


Figura 11 – Funcionamento da suspensão do veículo.
Fonte: adaptado de (BAUMGARTNER, 2018).

Feita a análise do estado da arte, o próximo passo é trazer alguns modelos de suspensões de trabalhos existentes, para que a base de desenvolvimento deste estudo possa se tornar mais sólida.

2.4 **Análises de sistemas de suspensão diversos**

Neste item serão mostrados e detalhados alguns métodos utilizados e diferentes abordagens para análise e síntese de sistemas de suspensão diversos. O foco principal são sistemas acoplados ao assento do equipamento em questão, que servem para diminuir a vibração transmitida do veículo para o operador, além de sistemas utilizados em robôs desenvolvidos para deslocamento em terrenos irregulares.

2.4.1 Suspensões acopladas ao assento

Para analisar o comportamento dinâmico do sistema, Gunston *et al.* (2004) utiliza duas configurações diferentes de suspensões com dois métodos distintos para comparação. Os métodos são:

- Método de parâmetros concentrados: Exige medições da dinâmica do mecanismo de forma separada de cada um de seus componentes. Os cálculos são feitos utilizando o algoritmo de 4ª ordem de *Runga-Kutta*.
- Modelo de *Bouc-Wen*: Utilizado para descrever sistemas histeréticos (conservam suas propriedades ou preservam deformações causadas pela ausência do estímulo que as gerou).

Os objetivos do estudo são dois, o primeiro foi quantificar o desempenho de previsão dos dois métodos alternativos de modelagem de assentos de suspensão projetados para veículos fora de estrada. O segundo foi comparar os pontos fortes e fracos dos modelos alternativos e identificar suas possíveis aplicações. A Figura 12 mostra os dois tipos de acoplamento da suspensão à estrutura do assento utilizadas para o estudo.

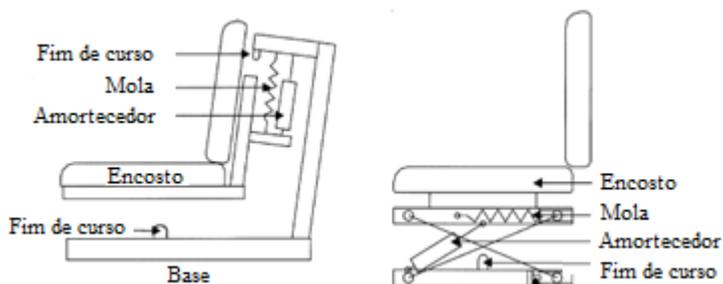


Figura 12 – Posições da suspensão.

Fonte: adaptado de (GUNSTON *et al.*, 2004).

Gunston *et al.* (2004) então concluiu, com a comparação dos dois métodos, que o de parâmetros concentrados pode ajudar os fabricantes de assentos a projetar novos modelos ou ainda modificar aqueles já existentes. Já o modelo de *Bouc-Wen* é particularmente adequado para situações em que um assento é uma entrada ou saída para outro sistema. Para esta aplicação, uma descrição do comportamento dinâmico global do banco é suficiente.

Já Maciejewski *et al.* (2014) propõem um sistema ativo para controle de suspensão, que pode ser composto tanto por um atuador de força quanto por um amortecedor pneumático. São três os controles que o sistema possui:

- Valor real de força que o sistema de suspensão deve gerar.
- O valor instantâneo do sinal que controla o elemento ativo da suspensão.
- Reconhecimento do valor da massa para aumento da eficácia do sistema.

O objetivo é um melhor controle de vibração da suspensão do assento e maior robustez do sistema conforme a massa do operador varia. Utilizando um sistema exclusivo de controle de vibração, a estrutura e os componentes individuais são apresentados, sendo possível obter as propriedades desejadas do sistema, tendo em vista os diferentes requisitos para os modernos sistemas de suspensão de assento.

Os resultados mostram um sistema, que devido a presença do controle ativo, possibilita melhores resultados no desempenho geral do conjunto de suspensão. O controle da massa aplicada também colabora de modo a aumentar significativamente a robustez do sistema. A Figura 13 mostra com detalhes o sistema proposto.

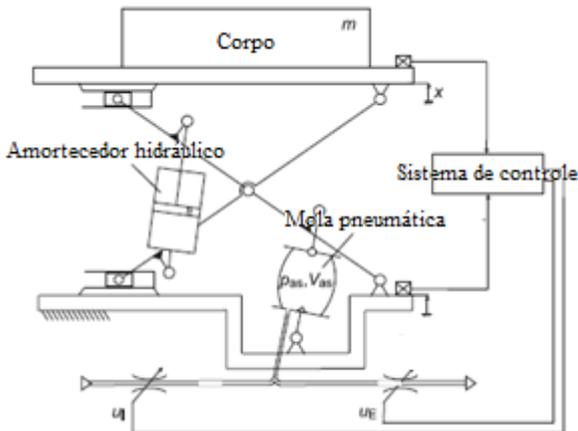


Figura 13 – Sistema de suspensão (Maciejewski).

Fonte: adaptado de (MACIEJEWSKI *et al.*, 2014).

Ainda, Ning *et al.* (2016) também propõem um sistema ativo para controle de suspensão, composto por dois atuadores, cada um com um

motor e um redutor. Ainda possui um sistema de controle de atrito por compensação com base na aceleração do assento. O objetivo principal do trabalho foi o controle da vibração de baixa frequência transferida ao assento pela suspensão do veículo, e ainda manter a passividade do sistema em alta frequência. Para obtenção dos resultados, o sistema foi comparado a um sistema de suspensão passiva de assento comum. A Figura 14 mostra o modelo proposto.

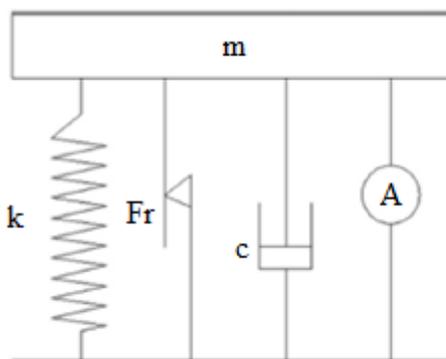


Figura 14 – Sistema de suspensão (Ning).
Fonte: adaptado de (NING *et al.*, 2016).

Ning *et al.* (2016) então concluem que com o sistema adicional de controle de atrito, os valores encontrados nas simulações são mais eficazes. Os testes ainda mostram que a resposta do sistema ativo são melhores do que as passivas, reduzindo a praticamente zero os níveis de desconforto.

Também, Stein e Múčka (2011) propõem o desenvolvimento de um modelo de simulação de uma suspensão de assento para carregadores, com um grau de liberdade, composto por um sistema dianteiro e outro traseiro. O sistema funciona de maneira progressiva, conforme a massa da carga a ser transportada varia. Um assento padrão disponível no mercado foi utilizado como referência. O método utilizado foi simulação para variações da massa através do *Matlab* e foram ainda utilizados parâmetros de otimização para melhoria nos resultados. O método foi aplicado somente no amortecedor do sistema, ou seja, a rigidez tanto da mola quando da borracha não foram utilizadas. A Figura 15 mostra o sistema proposto.

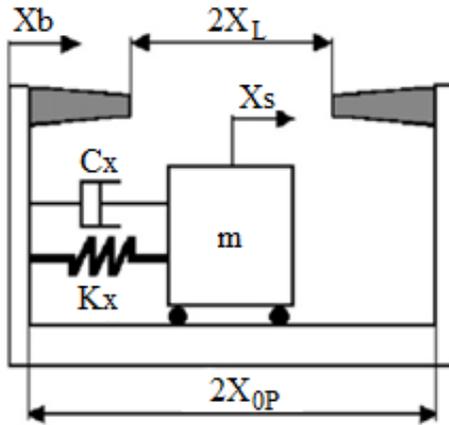


Figura 15 – Sistema de suspensão (Stein e Múčka).
 Fonte: adaptado de (STEIN e MÚČKA, 2011).

Stein e Múčka (2011) concluem que não é necessário ajustar o amortecedor de maneiras diferentes para excitações causadas por impulso das ocasionadas pelo terreno. Não há melhora significativa no que se diz respeito ao controle de vibrações causadas pelo deslocamento, mas o controle do choque causado pelo condutor é consideravelmente menor, possibilitando aumento de conforto.

2.4.2 Suspensões desenvolvidas para veículos robóticos

Appala e Ghosal (2015) tem em sua proposta a modelagem, simulação, projeto e experimentação de um robô com três rodas toroidais (capacidade de inclinação lateral que permite que a distância entre os pontos de contato entre a roda e o solo mude mesmo com um eixo de comprimento fixo). Para o conjunto, foi proposta uma suspensão baseada em um mecanismo quatro barras, que possuía dois graus de liberdade e eixo de comprimento fixo. O objetivo do trabalho foi mostrar que com a adição do conjunto, o arrasto das rodas em superfícies irregulares iria diminuir. A Figura 16 mostra o equipamento proposto, com detalhe na estrutura da suspensão.

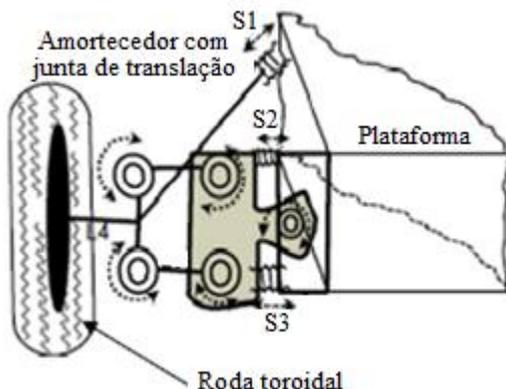


Figura 16 – Sistema de suspensão (Appala e Ghosal).
 Fonte: adaptado de (APPALA e GHOSAL, 2015).

Appala e Ghosal (2015) então realizaram testes para comprovação da diferença no uso da suspensão ao conjunto. Para os testes de funcionamento do mecanismo (no total três: movimento em linha reta, movimento circular e mudança de faixa), foram feitas simulações numéricas utilizando o *ADAMS/View*. De acordo com os resultados encontrados na simulação e experimentação, comprovou-se que o arrasto dos pneus foi menor com o uso da suspensão.

Com o mesmo objetivo, Nasu e Wada (2015) propuseram o desenvolvimento de uma unidade robótica com rodízios ativos, sistemas de suspensão independentes e um mecanismo diferencial, além de um sistema para seu controle. O rodízio ativo é equipado com rodas duplas, que são acionadas por um motor de um mecanismo de engrenagem diferencial. A configuração com rodado duplo contribui para reduzir os atritos ao fazer curvas, o que permite movimentos suaves do equipamento. A utilização da suspensão individual serve para manter os rodízios em contato constante com o solo. A Figura 17 ilustra o protótipo proposto.

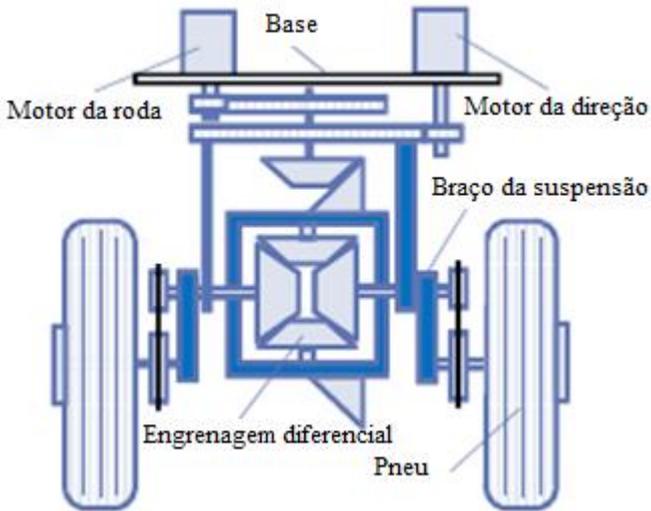


Figura 17 – Sistema de suspensão (Nasu e Wada).
 Fonte: adaptado de (NASU e WADA, 2015).

O protótipo foi testado em laboratório, de acordo com Nasu e Wada (2015), para obtenção dos parâmetros que tinham sido previamente estipulados pelo estudo. Os resultados mostraram que em relação a produtos anteriores, o novo protótipo possibilitava maior capacidade de movimentação para subir/descer degraus e irregularidades no solo devido ao sistema com suspensão individual.

Já Eathakota *et al.* (2010) apresentaram dois mecanismos baseados em atuadores de força lineares (o primeiro com um grau de liberdade e o segundo com dois graus) e uma proposta de controle das forças de contato entre roda e solo, para melhoria na tração e diminuição do escorregamento das rodas. Com o primeiro modelo, foi possível superar inclinações de até 40 graus. Com o segundo modelo, devido a adição do grau de liberdade, o protótipo conseguiu superar declives ainda maiores. O método utilizado foi a análise estática, que descreve a capacidade que cada um dos sistemas tem de controlar as forças de contato entre roda e solo, enquanto se movimentam por terrenos acidentados, juntamente com gráficos de viabilidade, para visualização da controlabilidade total do sistema. O programa utilizado para os testes de simulação foi o *MSC-VisualNastran*, que usa interface

MATLAB/SIMULINK. As Figuras 18 e 19 mostram com detalhes as estruturas de ambos os mecanismos.

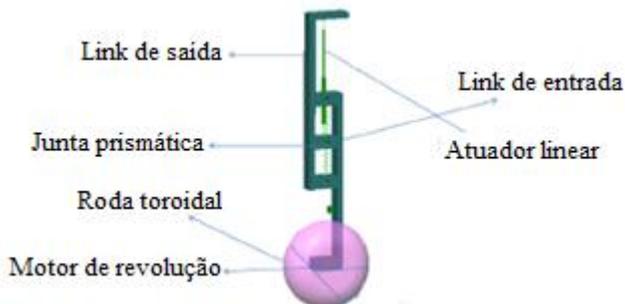


Figura 18 – Sistema de suspensão 1 GDL (Eathakota *et al.*).
Fonte: adaptado de (EATHAKOTA *et al.*, 2010).

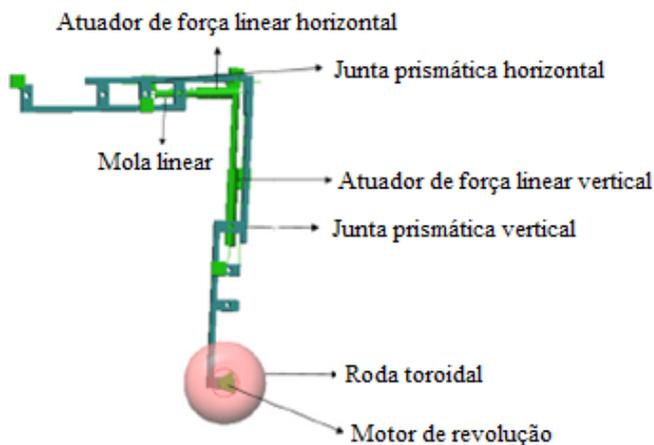


Figura 19 – Sistema de suspensão 2 GDL (Eathakota *et al.*).
Fonte: adaptado de (EATHAKOTA *et al.*, 2010).

Eathakota *et al.* (2010) puderam assim concluir que com os sistemas ativos, o projeto proposto baseado no atuador de força linear permite o controle das forças normais e, portanto, a margem sem escorregamento nos pontos de contato entre a roda e o solo. A adição das suspensões passivas redistribuem as forças normais alterando a postura sem a ajuda de nenhum atuador, o que permite o aumento das forças normais em algumas rodas em detrimento das outras. Além disso, também

foi demonstrado que é possível controlar a postura do veículo enquanto se faz o controle de força, assim o veículo tem a capacidade de evitar configurações instáveis.

Feita a análise de mecanismos de suspensão utilizados em aplicações diversas, o que será colocado agora é a análise de mecanismos de suspensão especificamente desenvolvidos para utilização em cadeiras de rodas, que servirá também de base para atingir o resultado esperado com este trabalho.

2.5 Análises de sistemas de suspensão para cadeiras de rodas

Neste item serão mostrados e detalhados alguns métodos utilizados e diferentes abordagens para análise e síntese de sistemas de suspensão especificamente utilizados em cadeiras de rodas, além das consequências da adição dos sistemas e ainda novos sistemas propostos na literatura. O objetivo deste item é mostrar o que existe de mais atual com relação a utilização de estruturas de suspensão, suas principais características e pontos onde se pode melhorar no desenvolvimento das mesmas, para atingir resultados ainda melhores.

Kwarcia *et al.* (2005) realizaram testes de durabilidade em nove modelos de cadeiras de rodas com sistema de suspensão, em comparação com cadeiras com estruturas dobráveis leves e ultraleves. O objetivo foi mostrar se a adição dos sistemas de suspensão causava mudança na vida útil dos equipamentos. O método utilizado foi o teste de fadiga utilizando *ANSI/RESNA*. Os resultados mostraram que em relação a este quesito (fadiga), o fato de adicionar uma suspensão não altera a vida útil da cadeira de maneira significativa.

Hostens *et al.* (2003) propuseram dois experimentos, utilizando dois sistemas de suspensão diferenciados:

- O primeiro ao ar livre, para uma cadeira de rodas equipada com uma suspensão simples de quatro molas, uma acima de cada um dos rodados, que consistiu na medição da vibração da cadeira de rodas durante a condução na velocidade máxima permitida de 6,5km/h, em terreno irregular. A medição foi feita imediatamente acima da suspensão nos lados esquerdo e direito, diretamente sob o assento onde as vibrações entram no corpo humano e no tórax do motorista.
- Para o segundo, foi desenvolvido um novo protótipo de cadeira de rodas, adequado para utilização em áreas externas com adaptações específicas, pois há rodas com diâmetro menor,

estruturas mais leves e um sistema de suspensão passivo único para toda a cadeira de rodas. O sistema de suspensão é composto por uma mola e um amortecedor hidráulico e é colocado sob o assento. O movimento relativo é restrito como um sistema de tesoura. Neste segundo experimento, não foram feitas medições ao ar livre, as vibrações foram simuladas em uma plataforma de vibração eletro-hidráulica.

Hostens *et al.* (2003) então concluíram que o corpo humano é muito sensível à faixa de frequência de 0,5 a 10 Hz. Também que ambas as cadeiras de rodas equipadas com sistema de suspensão passiva não tiveram um desempenho adequado nesta faixa de frequência, podendo causar dor nas costas e desconforto em geral ao usuário. Desta forma, como o risco de danos físicos não é susceptível de melhorar com estes sistemas de suspensão, novos projetos com maior conforto de baixa frequência e custos adicionais acessíveis devem ser elaborados.

No estudo de Kwarciak *et al.* (2008), foram realizados testes de vibração em 16 modelos de cadeiras de rodas (quatro com suspensão, quatro dobráveis, quatro rígidas e quatro de titânio rígidas). O objetivo do estudo foi confirmar o nível de importância da suspensão quando a cadeira está realizando movimento de descida e o freio é acionado, calculando o valor da diminuição da aceleração do assento. Os testes consistiram em descer obstáculos de 5, 10 e 15 cm, com o acionamento do freio.

Os resultados do trabalho de Kwarciak *et al.* (2008) mostraram que a medida que a força de frenagem foi aumentando, os mecanismos de suspensão necessitavam de maiores ângulos e conseqüentemente não forneciam mais a compressão necessária para dissipar a energia associada ao impacto do movimento. De todas as cadeiras de rodas de suspensão testadas, apenas um modelo apresentava o elemento de suspensão mais avançado e orientado de forma adequada. Ainda mostraram que os sistemas de suspensão baseados em elastômeros são eficientes para controle de vibrações de pequena magnitude, mas ineficazes com vibrações maiores. Pôde-se concluir que desenvolvimento adicional de cadeiras de rodas de suspensão é necessário para reduzir as limitações atuais e otimizar sua capacidade de proteger os usuários dos riscos associados à exposição de WBV. Além disso, pesquisas futuras sobre cadeiras de rodas manuais de suspensão devem se concentrar na absorção de energia dos elementos de suspensão durante a propulsão.

Requejo *et al.* (2008) determinaram em seu estudo as forças transmitidas a partir do assento e as acelerações experimentadas por

usuários de cadeira de rodas com inervações de tronco variadas, que foram expostas a repetidas colisões enquanto sentadas em cadeiras de rodas com quadros que continham estruturas de suspensão rígida ou traseira. A hipótese testada foi a de que os usuários de cadeira de rodas com e sem inervação tronco-músculo responderiam de maneira diferente às forças aplicadas e experimentariam acelerações em função do tipo de quadro da cadeira de rodas e da velocidade. Para indivíduos com tetraplegia e paraplegia alta, a paralisia da musculatura estabilizadora de tronco crítica prejudica muito o equilíbrio sentado. Consequentemente, os indivíduos sem inervação do tronco têm maiores respostas de aceleração da cabeça às forças aplicadas ao assento, portanto, preferem uma velocidade menor do que os indivíduos com inervação do tronco. O objetivo final do trabalho foi desenvolver uma avaliação objetiva da resposta do corpo humano a choques e vibrações e estabelecer a relação dessa resposta com o conforto da cadeira de rodas e a qualidade da viagem em usuários de cadeira de rodas que possuem lesão da medula espinhal.

Requejo *et al.* (2008) puderam então concluir que a suspensão da cadeira de rodas reduziu a força e as acelerações experimentadas pelos usuários e pode melhorar a função dos usuários em termos de conforto em velocidades mais altas, especialmente para usuários sem inervações do tronco muscular. Foi ainda determinado que a exposição à vibração pode depender da configuração da suspensão, da inervação do músculo de tronco e da velocidade, e que minimizar as forças transmitidas ao usuário é importante para a qualidade da condução. No entanto, mais pesquisas são necessárias para uma compreensão completa das relações entre choques e vibrações, nível de conforto e início da lesão.

Baronio *et al.* (2017) apresentam o desenvolvimento do projeto *Gölem*, que consiste no conceito e desenvolvimento de uma cadeira de rodas para facilitar o acesso de deficientes a áreas montanhosas. O equipamento é passivo e contém braços tanto na parte traseira quanto na dianteira para que uma segunda e terceira pessoa movimentem o cadeirante pelo terreno. A cadeira de rodas *Gölem* foi projetada para otimizar o equilíbrio lateral e melhorar a facilidade de dirigir e manobrar com o uso das guias, assim como o conforto do passageiro. O modelo prevê o uso de três rodas com suspensões independentes e um sistema de suspensão dupla, atingindo uma frequência própria do sistema. Além disso, a introdução de um sistema de direção contribuiu para facilitar ao manobrar o dispositivo. A Figura 20 mostra o protótipo em questão.



Figura 20 – Protótipo Projeto *Gölem*.
Fonte: (BARONIO *et al.*, 2017).

Os resultados de Baronio *et al.* (2017) mostram que o dispositivo possibilita maior facilidade no transporte de pessoas com deficiência do que os previamente fabricados. Embora o protótipo ainda esteja em produção, os testes computacionais já mostraram resultados melhores. Estes podem ser comprovados com a conclusão da fabricação da cadeira e assim serão possíveis também os testes de validação em usuários reais.

Com a revisão de produtos similares e descrição das principais características, além de benefícios e melhorias necessárias, temos uma melhor base para a continuação do desenvolvimento do produto proposto por este trabalho. No próximo item, será descrita a busca de patentes, ferramenta não muito utilizada em trabalhos acadêmicos, porém muito importante para coleta de informações, pelo detalhamento das estruturas, além das descrições de funcionamento, permitindo um estudo detalhado dos produtos existentes.

2.6 Busca de patentes

Maletz (2017, *apud* HOELTGEBAUM, 2016) mostra que são diversas as informações importantes reveladas pelas patentes. A data de

prioridade, por exemplo, mostra quando foi submetida a patente e os direitos sobre ela são válidos a partir deste dia. Os depositantes são aqueles que tem direitos sobre a patente, enquanto os inventores, como o nome sugere, são aqueles que desenvolveram o conceito proposto. As imagens e descrições apresentam detalhes de funcionamento e estrutura do produto em questão e podem ser utilizadas pelo projetista para demonstrar os princípios de funcionamento. Ainda, as reivindicações trazem tudo que a patente visa proteger.

Ainda, Maletz (2017) descreve que o depositante, quando realiza o pedido da patente, deve especificar o *IPC* (*International Patent Classification*), que é uma numeração que corresponde à divisão que a patente deve ser inserida. A numeração é dividida em seção (uma letra), classe (dois algarismos), subclasse (uma letra), grupo (algarismos) e subgrupo (algarismos). A Figura 21 mostra a classificação com uma das especificações correspondentes pesquisada neste trabalho.

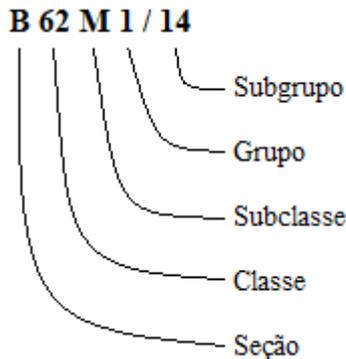


Figura 21 – Classificação Internacional de Patentes (*IPC*).

Fonte: adaptado de (INPI, 2016).

De acordo com o INPI (2016), a numeração da classificação descrita na figura, possui a seguinte identificação:

- Seção **B**: Operações de processamento; Transporte.
- Classe **62**: Veículos terrestres para trafegar de outra maneira que não sobre trilhos.
- Subclasse **M**: Propulsão pelo condutor de veículo com rodas ou de trenós; Propulsão mecânica de trenós ou bicicletas; Transmissões especialmente adaptadas para tais veículos.
- Grupo **1**: Propulsão pelo condutor de veículos com rodas.
- Subgrupo **14**: Operado exclusivamente manualmente.

Finalmente, Maletz (2017, *apud* HOELTGEBAUM, 2016) descreve a metodologia empregada para pesquisa de patentes, com orientação a pesquisa de mecanismos. Os passos seguidos pela proposta são os seguintes:

- Pesquisa preliminar: São utilizados termos genéricos para que o projetista conheça melhor a área de estudo.
- Análise da pesquisa preliminar: São identificadas as palavras chave mais apropriadas, além de determinados os *IPCs* correspondentes a área de estudo.
- Pesquisa detalhada: Busca com termos mais específicos, combinando as palavras chave com os *IPCs* previamente identificados.
- Análise da pesquisa detalhada: Menor número de resultados, porém maior qualidade. Nesta etapa, o projetista deve passar o filtro analisando todas as patentes.
- Análise do mecanismo: Individualmente as patentes são analisadas, sendo levantadas as principais características dos mecanismos encontrados.
- Mapeamento tecnológico: Classificação dos resultados de acordo com o objetivo do estudo, com identificação de áreas já exploradas e áreas promissoras.

Com a utilização da metodologia, foi então iniciada a busca de produtos já existentes no mercado, por meio de uma longa busca de patentes, com a finalidade de suprir informações, para que a equipe de projeto pudesse visualizar as possíveis concepções e filtrar as informações que pudessem ter aplicabilidade neste estudo.

Foram então analisadas mais de 20 mil patentes nas principais ferramentas de busca, com a utilização de diferentes termos na busca, a pesquisa preliminar resultou nas quantidades descritas conforme pode ser acompanhado na Tabela 2.

Tabela 2 – Busca de Patentes.

Texto da busca	Resultados		
	<i>Google patents</i>	<i>Espacenet</i>	<i>FPO</i>
<i>Wheelchair suspension</i>	10983	182	10337
" <i>Wheelchair suspension</i> "	140	20	324
" <i>Wheelchair control method</i> "	179	11	5
" <i>Chair suspension</i> "	108	5	68

Fonte: do Autor.

Dentre todas as analisadas, o primeiro filtro resultou na seleção de 40 para uma análise mais detalhada. Foi feito na sequência um segundo filtro (comparando *IPCs* com os resultados de busca), que resultou na seleção final de 12 patentes, que mais se aproximam da solução proposta por este trabalho. As características avaliadas foram os elementos utilizados nas suspensões, a complexidade das estruturas e o funcionamento de cada uma. Finalmente, a representação estrutural e a mobilidade foram calculadas em cada caso. No Capítulo 3 serão descritos os sistemas de suspensão escolhidos, suas principais características estruturais e as mobilidades.

Finalmente, os dois últimos subitens do Capítulo tratam da Teoria de Mecanismos e as Metodologias de Projeto existentes para desenvolvimento de mecanismos.

2.7 Teoria de Mecanismos

Tsai (2000) descreve como elos todos os corpos rígidos que fazem parte de um mecanismo ou máquina. A conexão entre elos pode ser chamada de junta, ou par cinemático. Os pares cinemáticos impõem restrições ao movimento relativo entre elos.

Simoni (2008) mostra a classificação dos pares cinemáticos, que podem ser inferiores ou superiores:

- Pares cinemáticos inferiores: O contato deste tipo de par é superficial. Os mais utilizados em mecanismos, máquinas e robôs são mostrados na Figura 22. A junta universal mostrada é tratada como par cinemático inferior, porém é formada por duas rotativas.

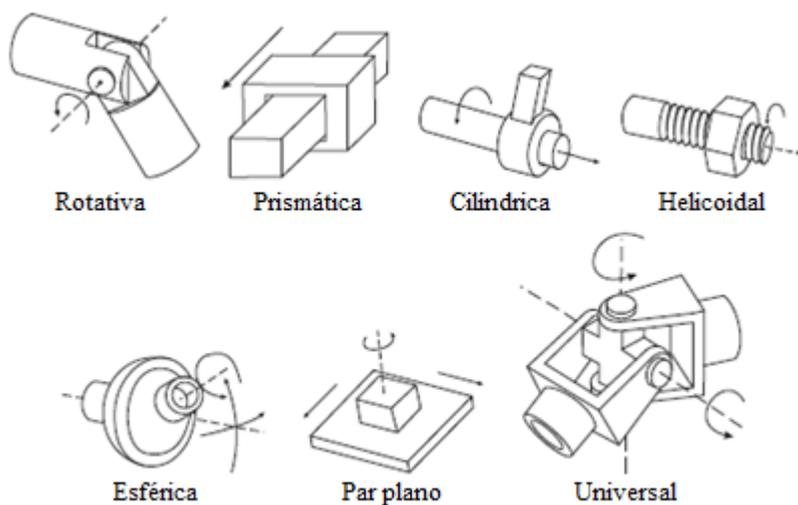


Figura 22 – Pares cinemáticos inferiores.

Fonte: adaptado de (SIMONI, 2008).

- Pares cinemáticos superiores: O contato deste tipo de par é pontual ou linear. Os mais utilizados em mecanismos, máquinas e robôs são dois, e são mostrados na Figura 23.

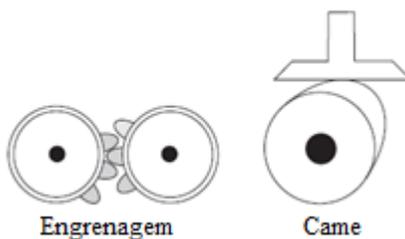


Figura 23 – Pares cinemáticos superiores.

Fonte: adaptado de (SIMONI, 2008).

Após a primeira classificação, passamos para a dos mecanismos em si. Tsai (2000) define os tipos de acordo com as características da cadeia cinemática, que é o conjunto de elos conectados através de pares cinemáticos. Podem estes ser seriais, paralelos e híbridos, como definido e mostrado na Figura 24, a seguir:

- Seriais: Cadeia cinemática aberta, ou seja, cada elo se conecta aos demais elos em apenas um ponto e segue apenas um caminho.
- Paralelos: Cadeia cinemática fechada, ou seja, os elos se conectam aos demais elos por pelo menos dois caminhos.
- Híbridos: Cadeia cinemática composta por pelo menos uma cadeia fechada e uma cadeia aberta.

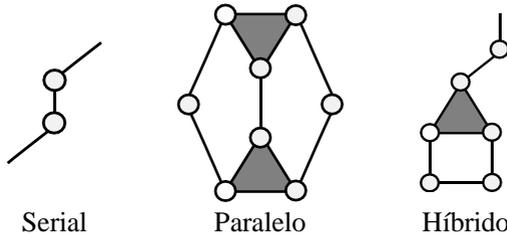


Figura 24 – Cadeias Cinemáticas.

Fonte: do autor.

Hunt (1978) então define mobilidade como o número de graus de liberdade de uma cadeia cinemática.

2.8 Metodologias de Projeto de mecanismos

O estudo de mecanismos é complexo, ou seja, é preferível que seja seguida uma metodologia específica, para que o projeto em si não fique dependendo única e exclusivamente da experiência dos projetistas envolvidos. Dentre as mais utilizadas, podemos citar de modo cronológico, a de Hartenberg e Denavit, no ano de 1964, depois ainda a de Yan, em 1999, a criada por Tsai em 2000 e finalmente, a metodologia desenvolvida no Laboratório de Robótica Aplicada desta Universidade, por Murai em 2013.

2.8.1 Hartenberg e Denavit

No trabalho de Hartenberg e Denavit (1964), a síntese de mecanismos é dividida em três fases:

- Síntese do Número: Determinação da quantidade de pares cinemáticos existentes no mecanismo, além de qual a forma que estarão ligados entre si. Este item influencia na mobilidade da

cadeia, que pode ser encontrada de acordo com a Equação de *Grübler*,

$$M = (n - 1 - j)\lambda + j \quad (2.1)$$

onde n corresponde ao número de elos, j é o número de pares cinemáticos com 1 grau de liberdade (GDL) e λ é a ordem do sistema de helicoides.

A equação (nem sempre utilizada desta maneira, pois possui derivações e muitos limites para utilização) define a mobilidade de um mecanismo com relação as suas características de estrutura. Porém, a mobilidade depende ainda de outros fatores, como o posicionamento dos pares cinemáticos e ainda o dimensionamento dos elos. Quando a mobilidade não resulta no valor correto, podemos utilizar a Equação de *Euler*,

$$v = j - n + 1 \quad (2.2)$$

onde v corresponde ao número de circuitos independentes da cadeia. É importante explicar que, para fins de cálculo, os elementos de pares cinemáticos (e) correspondem a duas vezes o número de juntas do sistema.

- **Síntese do Tipo:** Determinação de quais pares cinemáticos vão ser utilizados (juntas prismáticas, rotativas, universais, etc.). Esta etapa precisa de atenção do projetista, pois alguns fatores importantes devem ser considerados, como por exemplo, a complexidade dos mecanismos encontrados, que pode gerar alto custo de fabricação, montagem e manutenção. O número de cadeias geradas normalmente é grande nesta etapa, portanto, o projetista deve filtrar e listar as combinações ideais para seu projeto, com o auxílio de algoritmos computacionais.
- **Síntese Dimensional:** Determinação das dimensões dos elos do sistema, seus comprimentos, ângulos, pontos de interesse, etc., para que o mecanismo execute com perfeição a trajetória requerida.

2.8.2 Hong-Sen Yan

Yan (1998) propõe uma metodologia que utiliza uma representação de cadeias cinemáticas partindo de grafos, sendo que a

estrutura é determinada com a utilização e análise de mecanismos já existentes, que realizam movimentos parecidos com os desejados. A metodologia segue um fluxograma com etapas bem definidas e sistematizadas. A Figura 25 ilustra o fluxograma.

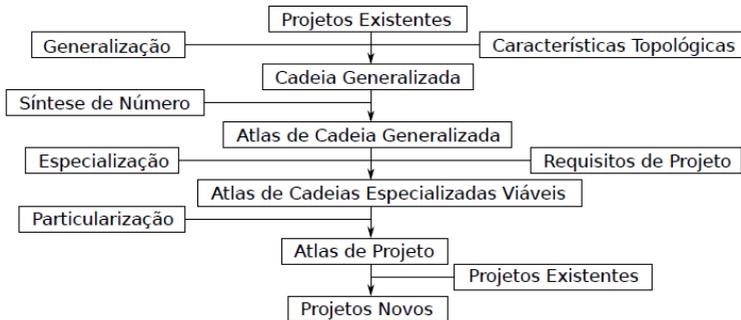


Figura 25 – Fluxograma de Yan.

Fonte: (MURAI, 2013).

2.8.3 Lung-Wen Tsai

Esta metodologia desenvolvida por Tsai (2000), segue a aplicação da Teoria de Grafos que foi proposta por Yan (1998), além de ser efetuada ainda a chamada Análise Combinatória. As etapas seguidas têm a seguinte estrutura:

- Passo 1: Determinação dos requisitos funcionais do projeto.
- Passo 2: Determinação do espaço de trabalho, da mobilidade e ainda a quantidade de circuitos independentes do sistema.
- Passo 3: Este prevê (só é executado quando se tem possibilidade) reescrever os requisitos encontrados no primeiro passo, como características estruturais.
- Passo 4: Enumeração de todas as cadeias que atendem as características estruturais propostas (através do uso da Teoria de Grafos e a Análise Combinatória).
- Passo 5: Geração e avaliação de todos os mecanismos possíveis, avaliando-se ainda os requisitos funcionais que antes não tinham sido avaliados.
- Passo 6: Escolha do mecanismo que mais se encaixa no que está sendo requisitado.

- Passo 7: Enfim, o último passo é a produção desde mecanismo escolhido.

2.8.4 Estevan Hideki Murai

Murai (2013) propõe a combinação das características apresentadas pelas três metodologias descritas, de modo a filtrar e mesclar as principais etapas, podendo assim chegar nos melhores resultados possíveis. As etapas contemplam 11 passos e têm a seguinte estrutura:

- Passo 1: Revisão do estado da arte de mecanismos que executam as funções desejadas ou ainda similares. Em paralelo, determinação dos requisitos do usuário.
- Passo 2: Identificação das características funcionais e estruturais dos mecanismos encontrados no Passo 1.
- Passo 3: Determinação dos requisitos funcionais e estruturais para o projeto em desenvolvimento.
- Passo 4: Seleção de três critérios estruturais como entradas para o gerador.
- Passo 5: Geração de todas as cadeias cinemáticas possíveis.
- Passo 6: Avaliação de todas as cadeias geradas e posterior eliminação daquelas que não cumprirem os critérios funcionais do Passo 3. (Se, após este item, não houverem cadeias restantes, as características estruturais devem ser alteradas, além ser necessária uma reavaliação do gerador).
- Passo 7: Execução da Síntese do Tipo para as cadeias selecionadas.
- Passo 8: Realização da Síntese Dimensional, de acordo com os mecanismos desenvolvidos no Passo 7.
- Passo 9: Produção do protótipo. (Se algum ajuste for necessário, as Etapas 7 e 8 devem ser refeitas).
- Passo 10: Desenvolvimento da documentação do protótipo.
- Passo 11: Início da produção.

Listadas as principais metodologias utilizadas no desenvolvimento de mecanismos em sua ordem cronológica, este trabalho será desenvolvido seguindo os principais passos da metodologia proposta por Murai (2013), por englobar as principais características das demais e utilizar as melhores ferramentas de cada uma delas.

2.9 Considerações finais do Capítulo

Este Capítulo apresentou, em sua primeira parte, a problemática que este estudo visa resolver, além de uma revisão de trabalhos relacionados a mecanismos com estrutura e funcionamento semelhantes ao proposto por esta dissertação, além dos mais avançados sistemas de suspensão existentes da literatura e ainda uma análise de sistemas de suspensão diversos e específicos utilizados em cadeiras de rodas. O segundo ponto abordado foi a descrição de como foi realizada a busca de patentes, suas vantagens e resultados. A última parte trouxe, além da descrição da Teoria de Mecanismos, quais são as Metodologias empregadas em seu desenvolvimento.

O Capítulo 3 trará uma descrição mais detalhada do problema em questão, além de um maior detalhamento dos mecanismos encontrados e selecionados das patentes pesquisadas e da pesquisa de mercado. Por fim, algumas considerações importantes para o desenvolvimento do projeto.

3 PROJETO

Nos Capítulos 1 e 2 foram descritas informações sobre as dificuldades encontradas por cadeirantes para se locomoverem em locais de difícil acesso, além de outros produtos que já estão disponíveis no mercado para minimização do problema, suas características e defeitos. Ainda uma revisão bibliográfica detalhada que servirá de embasamento para o desenvolvimento do restante desta pesquisa. Todos os conceitos apresentados vão servir de base para o desenvolvimento de um novo produto, contemplando os conhecimentos de mecanismos e metodologia de projeto para a sua criação.

A literatura nos disponibiliza diversas metodologias para auxílio no desenvolvimento de produtos e projetos. Dentre as disponíveis, este trabalho utilizará algumas etapas do PRODIP (BACK *et al.*, 2008) que consiste no processo de desenvolvimento de produtos industriais e é dividido em fases (Planejamento, Projetação e Implementação). A concepção do produto irá seguir os passos do modelo escolhido, sendo desmembrado em Projeto Informacional e Projeto Conceitual, seguindo os passos descritos pela Figura 26. É importante frisar que algumas das principais etapas de desenvolvimento não serão utilizadas por não influenciarem diretamente os resultados esperados com este trabalho.

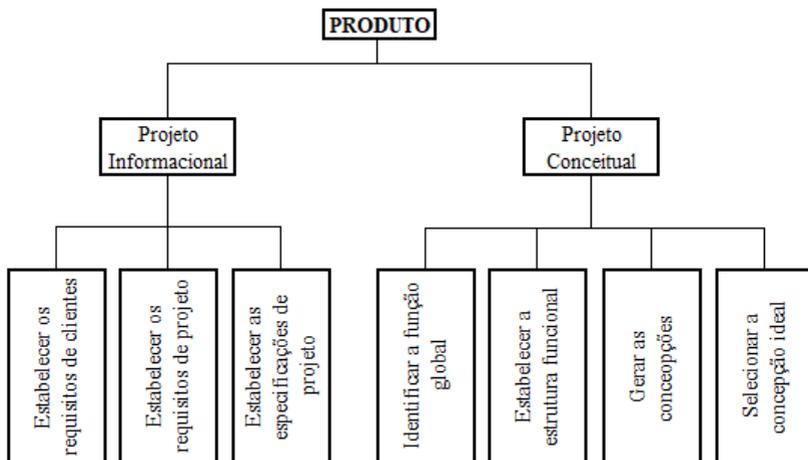


Figura 26 – Estrutura de Projeto.

Fonte: do Autor.

3.1 Descrição do problema

A escolha ideal de uma cadeira de rodas leva em consideração alguns detalhes que podem passar despercebidos, ou até mesmo que possam não ser considerados relevantes quando estamos falando de consumidores tradicionais. Desta forma, é preciso analisar este lado da problemática de outras maneiras. Devem-se considerar os diferentes tipos de cadeiras existentes no mercado (manuais, elétricas, adaptáveis, etc.). Para exemplificar, a cadeira deve ter uma estrutura em que se possa fazer algumas alterações para que possa ser adaptado o mecanismo em questão deste trabalho.

Dentre os problemas que as cadeiras de rodas com sistemas de suspensão visam sanar, podemos citar os níveis de vibração mínimos para que não seja causado desconforto ao usuário (HOSTENS *et al.*, 2003).

3.2 Mecanismos encontrados nas patentes

No Capítulo 2 foi descrita a metodologia utilizada para que se pudesse chegar nos resultados que serão apresentados nos próximos subitens deste trabalho. As melhores patentes foram selecionadas e foram encontradas as representações estruturais dos conjuntos de suspensão, para que pudessem ser posteriormente encontradas as mobilidades de cada estrutura.

O objetivo do item é mostrar imagens das cadeiras de rodas e suas suspensões e representações estruturais, descrever brevemente o funcionamento das estruturas, mostrar as semelhanças entre elas, números de elos, juntas e mobilidades mais utilizadas, análise dos movimentos que as cadeiras desenvolvem, complexidade dos sistemas, que, em conjunto com os demais itens mostrados anteriormente, servirão para os ajustes necessários ao resultado proposto por este trabalho.

3.2.1 *Wheel chair with independent suspension (US5855387)*

Sistema composto por dois conjuntos de suspensão, um dianteiro e outro traseiro. A estrutura traseira possui um eixo de balanço traseiro pivotado ao encosto do banco, com a adição de uma mola. Cada roda traseira possui um braço oscilante ligado a estrutura do banco. Já a estrutura dianteira é composta por uma barra flutuante acoplada as rodinhas. O movimento vertical da barra flutuante é controlado por 3

amortecedores. A Figura 27 mostra a referida patente e a representação estrutural da suspensão.

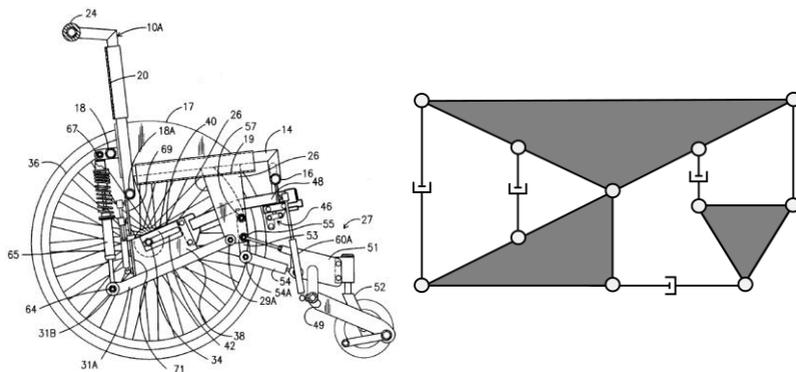


Figura 27 – Patente US5855387.

Fonte: adaptado de (GILL e HUDSON, 1999).

A mobilidade foi então calculada, resultando em $M = 3$.

3.2.2 *Seat suspension for wheelchair (US6547206B1)*

Sistema de suspensão encaixado diretamente na estrutura da cadeira. A suspensão é encaixada abaixo do assento, sem atrapalhar o estrutural do equipamento. Sistema utiliza molas semelhante aos feixes de molas utilizadas em suspensão de caminhões, com regulagem de altura para maior conforto. A Figura 28 mostra a referida patente e a representação estrutural da suspensão.

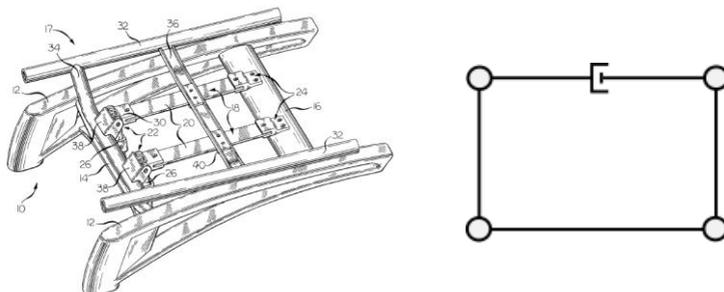


Figura 28 – Patente US6547206B1.

Fonte: adaptado de (DICKIE, 2003).

A mobilidade foi então calculada, resultando em $M = 2$.

3.2.3 Sport utility wheelchair (US6979010B1)

Suspensão desenvolvida para prática de esportes, mas também pode ser utilizada diariamente. A estrutura é acoplada ao assento da cadeira, com sistema de suspensão integrado. O centro de gravidade resultante na relação usuário/cadeira é para frente do eixo da roda principal do conjunto. A Figura 29 mostra a referida patente e a representação estrutural da suspensão.

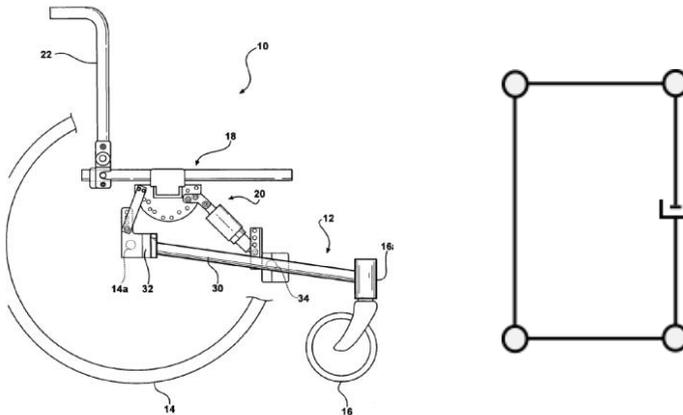


Figura 29 – Patente US6979010B1.
Fonte: adaptado de (KWAPIS, 2005).

A mobilidade foi então calculada, resultando em $M = 2$.

3.2.4 Obstacle traversing wheelchair (US7597163B2)

Sistema de suspensão inclui molas na parte dianteira e também na parte traseira da estrutura. A estrutura é composta por um quadro, um braço articulado pivotado, um conjunto de tração e os rodízios dianteiro e traseiro da cadeira. O sistema ainda possui várias configurações possíveis para utilização, porém o princípio de funcionamento é o mesmo. A Figura 30 mostra a referida patente e a representação estrutural da suspensão.

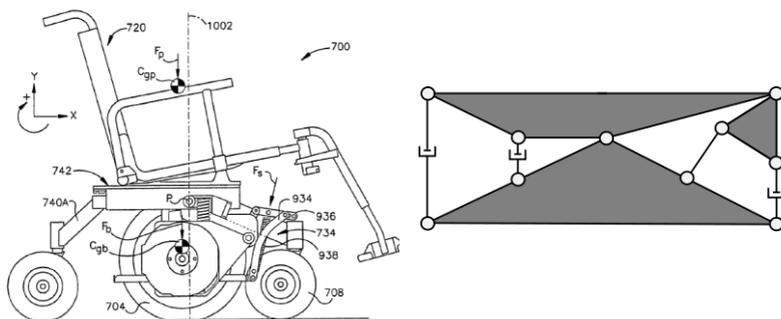


Figura 30 – Patente US7597163B2.

Fonte: adaptado de (GOERTZEN e NULL, 2009).

A mobilidade foi então calculada, resultando em $M = 1$.

3.2.5 Wheelchair suspension system (US8011680B2)

Sistema de suspensão que contém molas semelhante ao feixe de molas, acoplado imediatamente abaixo do acento da cadeira. Os elementos que suportam a suspensão funcionam de modo a permitir que a sua estrutura se mantenha de maneira vertical. A Figura 31 mostra a referida patente e a representação estrutural da suspensão.

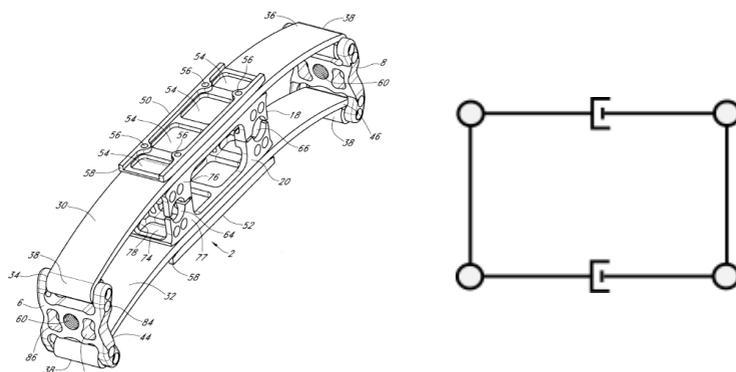


Figura 31 – Patente US8011680B2.

Fonte: adaptado de (CHELGREN, 2011).

A mobilidade foi então calculada, resultando em $M = 3$.

3.2.6 *Wheelchair modular rear suspension (US20120013098A1)*

Sistema de suspensão com mola, acoplado diretamente abaixo do assento da cadeira. O sistema possui um suporte para a suspensão, além de um braço articulado. Além da mola, várias juntas rotativas e dois *links* de seção ajustáveis são adicionados ao sistema, para possibilitar melhor distribuição de peso ao usuário. A Figura 32 mostra a referida patente e a representação estrutural da suspensão.

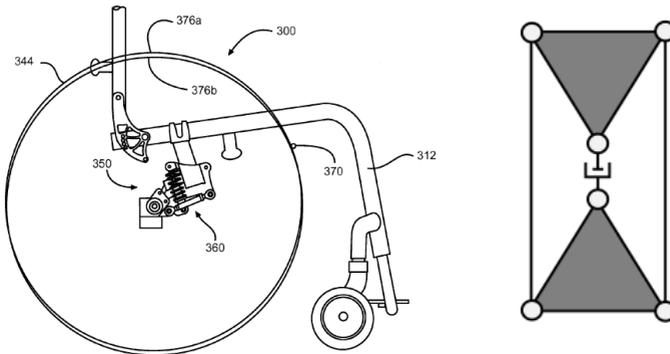


Figura 32 – Patente US20120013098A1.

Fonte: adaptado de (HART, 2012).

A mobilidade foi então calculada, resultando em $M = 1$.

3.2.7 *Moyen de transport tout terrain pour personnes à motricité déficiente (EP2689762A1)*

Esta patente corresponde ao Projeto *Gölem* (Baronio *et al.* 2017), que consiste em um sistema desenvolvido para transporte de cadeirantes por superfícies montanhosas, com o auxílio de outras duas pessoas (uma segura a parte traseira da estrutura e outra a parte dianteira para guiar o usuário). Sistema contém duas molas a gás, dispostas simetricamente em cada lado do equipamento. Ainda duas barras transversais curvadas acopladas aos rodados que possibilitam o movimento independente de cada lado da estrutura. E finalmente, um amortecedor que liga a estrutura da suspensão ao assento de modo a otimizar o conforto. A Figura 33 mostra a referida patente e a representação estrutural da suspensão.

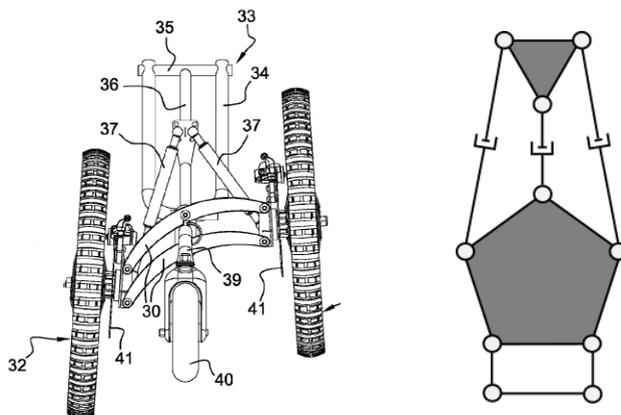


Figura 33 – Patente EP2689762A1.
Fonte: adaptado de (FERRIOL e ODIN, 2014).

A mobilidade foi então calculada, resultando em $M = 4$.

3.2.8 *Folding wheelchair with improved frame and suspension system (US4861056)*

Sistema de suspensão contém duas abas laterais montadas em braços de articulação e fixados a estrutura da cadeira. As extremidades traseiras da abas de suspensão estão fixadas rotativamente ao eixo da roda. Adicionalmente ainda possui um amortecedor e um elemento elástico. A Figura 34 mostra a referida patente e a representação estrutural da suspensão.

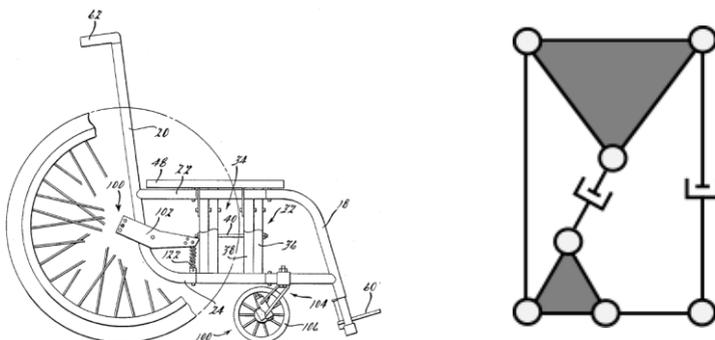


Figura 34 – Patente US4861056.
Fonte: adaptado de (DUFFY JR. e FLUM, 1989).

A mobilidade foi então calculada, resultando em $M = 3$.

3.2.9 *Seat suspension assembly (US6237889)*

Estrutura desenvolvida para aplicação em veículos aquáticos, com estrutura que combina mola e suspensão a ar atuada. Sistema contém braços articulados e uma mola que é alocada imediatamente atrás da estrutura do encosto do banco, sendo o elemento pivotante fixado de modo rotativo à armação, permitindo que o assento se mova em relação à estrutura. A Figura 35 mostra a referida patente e a representação estrutural da suspensão.

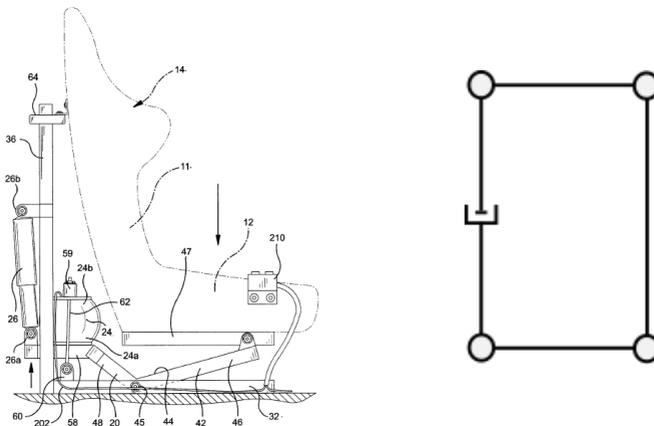


Figura 35 – Patente US6237889.

Fonte: adaptado de (BISCHOFF, 2001).

A mobilidade foi então calculada, resultando em $M = 2$.

3.2.10 *Suspension system for a wheelchair (US6796568)*

Sistema possui uma barra transversal pivotada à cadeira, que gira no sentido longitudinal da estrutura, além de uma mola para controle do movimento de articulação da barra. O conjunto inclui um componente de articulação ligado à barra transversal de modo a poder rodar em torno de um eixo vertical, e um segundo componente de articulação ligado de forma elástica ao primeiro componente de articulação. A Figura 36 mostra a referida patente e a representação estrutural da suspensão.

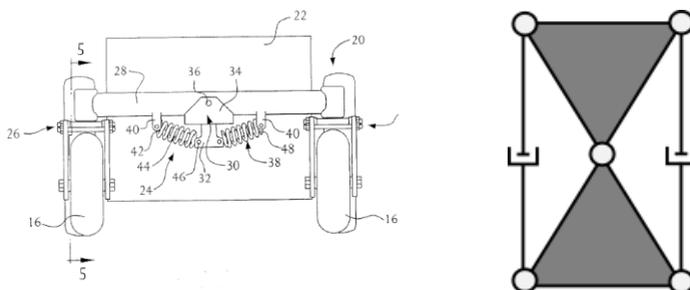


Figura 36 – Patente US6796568.
Fonte: adaptado de (MASTIS *et al.*, 2004).

A mobilidade foi então calculada, resultando em $M = 1$.

3.2.11 Wheelchair with improved suspension (US6412804B1)

Estrutura principal em forma de triângulo presa em uma viga longitudinal. Também possui um amortecedor central. A estrutura é montada de maneira independente, sendo um conjunto de suspensão colocado para cada rodado da cadeira. A Figura 37 mostra a referida patente e a representação estrutural da suspensão.

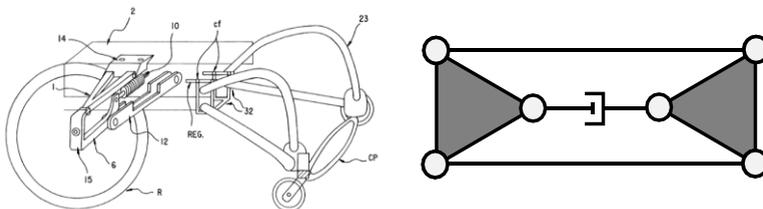


Figura 37 – Patente US6412804B1.
Fonte: adaptado de (DIGNAT, 2002).

A mobilidade foi então calculada, resultando em $M = 1$.

3.3 Pesquisa de mercado

Em paralelo a busca de Patentes, foi também desenvolvida uma pesquisa, para que fosse possível analisar e separar as melhores soluções existentes no mercado. Dentre os mais diversos produtos, foram separados aqueles que mostraram as soluções mais inovadoras e se aproximaram do resultado esperado com este trabalho. Cada um dos produtos será mostrado e sua estrutura analisada neste item do estudo.

3.3.1 *Modelo - Ortomix*

Vendida por uma empresa Brasileira, é fabricada sob medida, de acordo com formulário de prescrição do usuário. Sua suspensão consiste praticamente em um mecanismo quatro barras transversal inclinado e um amortecedor horizontal. A Figura 38 mostra a cadeira, e respectiva suspensão.



Figura 38 – Cadeira de rodas (Ortomix).

Fonte: <http://www.ortomix.com.br/produtos/catalogo-uso-ativo/linha-esportiva/rally>.

3.3.2 *Modelo – Icon*

Este modelo possui ajustes em sua geometria que podem ir se adaptando conforme o corpo do usuário muda. A suspensão permite ajuste de peso, com níveis de compressão e balanço variáveis. Ainda existe a opção de bloquear a suspensão, quando o usuário não sentir necessidade de uso. A Figura 39 ilustra a cadeira e sua suspensão.



Figura 39 – Cadeira de rodas (Icon).
Fonte: <http://iconwheelchairs.com/a1/>.

3.3.3 Modelo – TEKD

O sistema consiste em uma estrutura simples, que é acoplada a estrutura da cadeira de rodas manual, visando diminuição dos choques nas rodas traseiras ocasionados ao longo do deslocamento do usuário. No momento existem dois modelos do equipamento, que podem ser instalados em modelos específicos de cadeiras. A Figura 40 mostra o sistema.



Figura 40 – Sistema de suspensão (TEKD).
Fonte: <http://tekd.com/quadshox-adds-suspension-to-manual-wheelchairs/>.

3.3.4 Modelo – Invacare

Esta cadeira possui dois sistemas independentes de suspensão. O primeiro é acoplado às rodas dianteiras e o segundo às rodas traseiras.

Ambos são sistemas simples, ajustáveis de acordo com o peso do usuário, que visam suavização dos movimentos durante o deslocamento. Ainda estão disponíveis aos conjuntos, elastômeros que visam aumentar/diminuir a rigidez do sistema. A Figura 41 mostra a cadeira em questão.



Figura 41 – Cadeira de rodas (*Invacare*).

Fonte: <http://www.usatechguide.org/itemreview.php?itemid=848>.

3.3.5 Modelo – *Everest & Jennings*

Este modelo possui um sistema simples que é acoplado ao rodado traseiro da cadeira. A sua função é tornar o deslocamento o mais suave possível. A Figura 42 ilustra a cadeira e sua suspensão.



Figura 42 – Cadeira de rodas (*Everest & Jennings*).

Fonte: <http://www.medwow.com/med/manual-wheelchair/everest-jennings/barracuda/20541.model-spec>.

3.3.6 *Modelo – Colors*

Este equipamento possui um conjunto de suspensão estilo *wishbone* (semelhante às utilizadas em veículos). O conjunto é fixado em dois pontos na cadeira através de juntas esféricas, o que proporciona maior controle de inclinação das rodas, ou seja, os pneus mantêm maior área de contato possível com o solo. Na Figura 43 podemos observar a cadeira e sua suspensão.



Figura 43 – Cadeira de rodas (*Colors*).

Fonte: https://www.medicaldepartmentstore.com/Colours-In-Motion-Boing-Ultra-Lightweight-Wheelc-p/colours_boing.htm.

3.3.7 *Modelo – Sunrise Medical*

É uma cadeira utilizada para esportes e possui um conjunto de suspensão com mola centralizada abaixo do assento e que permite suavidade e estabilidade nos movimentos. Também possibilita maior conforto ao usuário. A Figura 44 nos traz a respectiva cadeira de rodas e sua suspensão.



Figura 44 – Cadeira de rodas (*Sunrise Medical*).

Fonte: <http://www.usatechguide.org/itemreview.php?itemid=247>.

3.3.8 Modelo – *Loopwheels*

Este equipamento consiste em rodas com sistema de molas de carbono tipo lâmina acopladas aos pneus e ao cubo central através de conectores, visando redução na vibração, melhoria no desempenho e aumento no conforto durante o deslocamento. O material das molas durante a fabricação é variável de acordo com o nível de compressão desejado. Os três laços trabalham em conjunto para se adequar constantemente às irregularidades do terreno. Na Figura 45 pode-se visualizar tal estrutura.



Figura 45 – Rodas (*Loopwheels*).

Fonte: <https://www.loopwheels.com/products/wheelchair-wheels/>.

3.3.9 Modelo – Softwheel

Possui funcionamento parecido ao sistema *Loopwheels*, porém utiliza amortecedores no lugar das molas tipo lâmina. Pode ser fabricada em magnésio, alumínio ou fibra de carbono, com ajuste de rigidez. Podemos visualizar o equipamento na Figura 46.



Figura 46 – Rodas (*Softwheel*).

Fonte: <http://softwheel.technology/theacrobat/>.

3.4 Considerações de Projeto

Tendo como base todo o material encontrado e os melhores modelos de suspensões já desenvolvidos, o que se pode perceber é que existem sistemas que possuem estruturas simples demais, o que ocasiona limitação na função de amortecimento. Já outros que possuem estruturas complexas que tornam os mecanismos muitas vezes redundantes e também alguns que possuem tecnologias avançadas e tornam-se muito caros, pelo fato de terem em suas estruturas controles ativos de funcionamento, por exemplo. Dados estes fatos, serão aqui listadas algumas considerações a serem executadas para que o presente trabalho possa chegar a uma solução satisfatória para o problema. As considerações envolvem tanto o desenvolvimento do produto quanto a síntese de mecanismos para realizar a função desejada.

3.4.1 Dimensionamento

De acordo com a ABNT NBR 9050, o espaço para instalação da suspensão é limitado pelas medidas internas da parte inferior da cadeira de rodas. As medidas são padronizadas e todas as cadeiras de rodas fabricadas (tanto manuais quanto automáticas) devem seguir o referencial. A Figura 47 ilustra uma vista frontal e uma lateral com as medidas em questão.

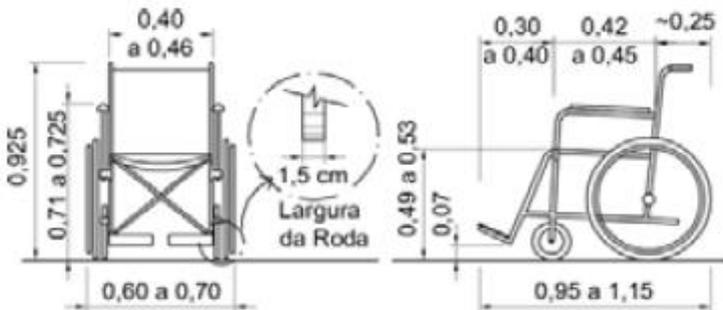


Figura 47 – Vista frontal e lateral padrão de medidas de uma cadeira de rodas.
Fonte: adaptado de (ABNT NBR 9050).

3.4.2 Peso

Ainda de acordo com a ABNT NBR 9050, existem limitações para o peso de uma cadeira de rodas. Para cadeiras com acionamento manual, o peso deve estar entre 12 e 20kg. A estrutura da suspensão deve ter peso baixo para que se possa instalar no maior número possível de equipamentos, sem desrespeitar o que está descrito na norma.

3.4.3 Material

Embora não existam especificações que considerem o material de fabricação de estruturas acopladas as cadeiras de rodas, é importante que os utilizados neste projeto sejam leves, pela limitação de peso do conjunto. Um segundo fator é a vida útil, que deve ser viável, assim os materiais precisam ser resistentes. Outro importante fator é o de que este tipo de equipamento pode estar em constante contato com ambiente médico-hospitalar, assim a suspensão precisa ser de fácil limpeza e manutenção.

3.4.4 Funções

Os equipamentos existentes, em sua grande maioria, apenas suavizam (através dos conjuntos de mola ou sistemas de amortecimento) os impactos ocasionados por defeitos ou obstáculos durante o deslocamento. O que seria interessante é o desenvolvimento de um mecanismo que possua maior controle no balanço e movimentação independente das rodas, visando diminuição da inclinação frontal e lateral do equipamento, mantendo o usuário o mais próximo da horizontalidade possível, atingindo níveis ainda maiores de amortecimento, e consequentemente conforto e estabilidade.

3.4.5 Mobilidades

Seguindo a linha das funções que este projeto visa suprir, o que se busca é um mecanismo que, além de diminuir a angulação do balanço vertical do equipamento, através da adição de um elemento de amortecimento ao conjunto final do produto, também contemple na diminuição das angulações frontal e lateral da cadeira de rodas, através da adição de elos e juntas ao sistema, para que se possa chegar nas três mobilidades necessárias ao resultado final esperado. A Figura 48 mostra em detalhes as angulações a serem evitadas ao usuário movimentar-se.

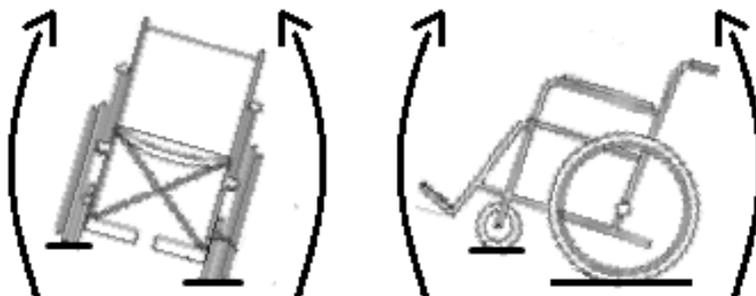


Figura 48 – Angulações frontal e lateral da cadeira de rodas.
Fonte: adaptado de (ABNT NBR 9050).

3.4.6 Aplicabilidade

A literatura nos mostra uma boa diversidade de modelos, porém são estruturas que são desenvolvidas para equipamentos específicos. As suspensões vêm acopladas às cadeiras, muitas vezes não sendo possível

nem sua remoção sem interferir na estrutura principal do equipamento. Por este motivo, devemos considerar que para o desenvolvimento do mecanismo de suspensão deste trabalho, possa ser utilizada uma estrutura que possa se acomodar da melhor maneira no maior número possível de cadeiras de rodas.

A fixação também tem de ser considerada, pois deve possuir um sistema adaptável, facilitando o encaixe e proporcionando instalação facilitada em uma boa gama de modelos.

3.5 Considerações do Capítulo

Neste Capítulo foi definido o problema que este trabalho visa resolver, além das ferramentas complementares que ajudaram a definir as características do produto final. A metodologia escolhida possui inúmeros passos, alguns desnecessários ao propósito do resultado buscado. Desta forma, somente foram aqui descritas as ferramentas utilizadas no decorrer da pesquisa.

A busca de patentes e a pesquisa de mercado foram duas importantes ferramentas utilizadas, pois auxiliarão nas escolhas da concepção final do produto, de modo que apresentaram um bom número de mecanismos já desenvolvidos, as movimentações que cada um consegue efetuar, suas composições e ainda as possibilidades de melhorias. Assim puderam ser definidas as diretrizes que devem ser utilizadas no próximo Capítulo que será a síntese de mecanismos para este fim.

4 SÍNTESE DE MECANISMOS

Neste Capítulo serão apresentados os critérios funcionais e estruturais que o mecanismo proposto deverá atender, além do conceito do produto final. Para a escolha dos critérios, foi feita uma criteriosa busca de patentes, além de uma profunda pesquisa de mercado, as quais foram descritas no Capítulo 3 deste trabalho. Estes critérios visam um melhor funcionamento da suspensão e são baseados nas estruturas mais significativas encontradas na bibliografia.

4.1 Conceito do mecanismo

A criação do conceito de um produto que tem em sua base o desenvolvimento de um mecanismo para seu funcionamento, exige que sejam relacionados alguns itens para que se forme uma base sólida e que possa ser desenvolvida a melhor opção. No Capítulo 3 deste trabalho, todas as diretrizes necessárias ao desenvolvimento do estudo foram mostradas e descritas (busca de patentes, pesquisa de mercado e as diretrizes de projeto). Finalmente, na Figura 49, é esboçado o conceito inicial do produto, que será somado aos critérios que serão descritos neste Capítulo, para que se possa chegar a versão final do mecanismo proposto.

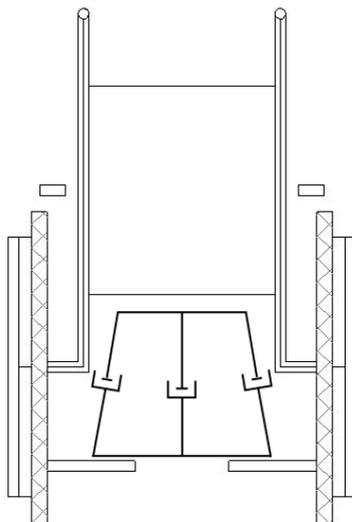


Figura 49 – Esboço inicial da suspensão.
Fonte: do Autor.

4.2 Projeto do mecanismo

As metodologias de projeto para criação de mecanismos sintetizam o seu processo de criação. Das diversas metodologias abordadas anteriormente, pudemos comprovar que as estruturas são similares. Neste item será mostrada uma metodologia que abrange as etapas mais gerais na criação de mecanismos. A Figura 50 mostra os passos seguidos por este trabalho, parte já descrita em Capítulos anteriores e a parte faltante no processo.

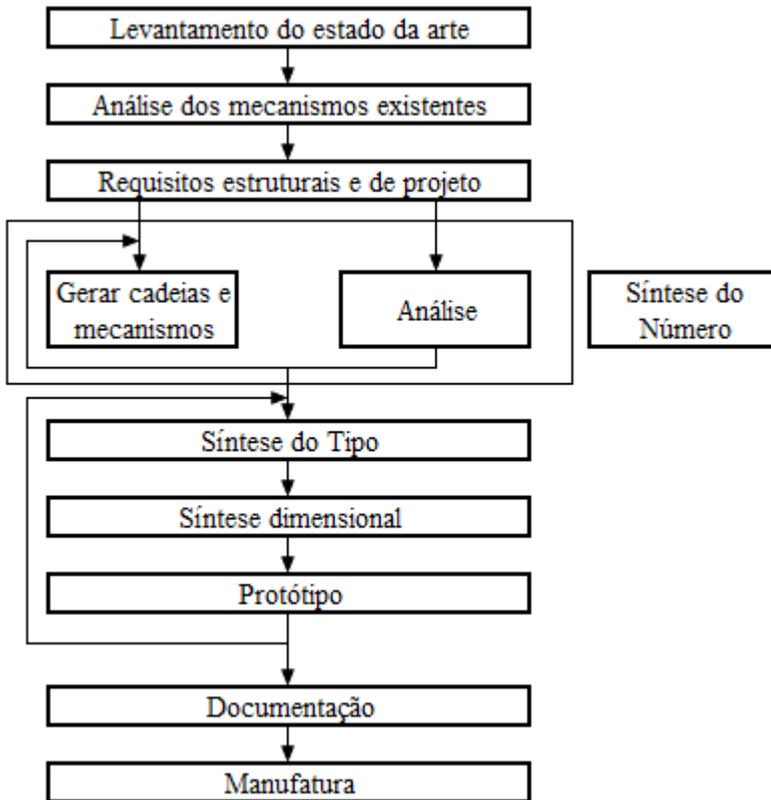


Figura 50 – Estrutura metodologia de projeto de mecanismos.
 Fonte: adaptado de (MURAI, 2013).

Depois da criação do conceito, o passo seguinte é a escolha de todos os critérios que a estrutura tem que atender, tanto funcionais, quanto estruturais.

Os critérios funcionais são aqueles que apresentam quais as características que o mecanismo necessita possuir. São todas as especificações gerais (podendo ser mensuráveis ou não). As características escolhidas para a concepção final do produto, normalmente estão vinculadas às funções que os elos terão na estrutura, como por exemplo, quais os melhores elos para que sejam alocadas as molas/amortecedores do sistema.

Já os critérios estruturais são aqueles que, assim como o nome sugere, envolvem as características da estrutura do mecanismo. Esses critérios são descritos depois que é definido o conceito do produto, e para tal, utiliza-se a síntese de mecanismos para que se alcance a solução final. Como exemplo de requisitos estruturais podemos citar a mobilidade requerida, a ordem do espaço de trabalho, os circuitos, elos e juntas necessários.

4.2.1 Critérios funcionais

Para a escolha dos critérios funcionais, foram identificadas características que o mecanismo precisa conter, para que tenha um melhor funcionamento, seja mais fácil de ser acoplado, de fácil manutenção e realize as funções previamente estabelecidas. O levantamento mostra os seguintes itens:

- Ter estrutura compacta;
- Possuir simetria;
- Possibilitar movimento independente das rodas do equipamento a ser acoplado;
- Ter um elo fixo (acoplado ao assento);
- Movimentar-se em três direções ($M = 3$).

4.2.2 Critérios estruturais

Para que fossem escolhidos os critérios ideais para as opções de princípios de solução do presente trabalho, foram analisadas inúmeras patentes e posteriormente foi criada uma tabela que contém os melhores mecanismos encontrados, com detalhes contendo a mobilidade, número de circuitos, número de elos e de juntas para cada um dos casos. A Tabela 3 mostra os resultados obtidos.

Tabela 3 – Estruturas Patentes escolhidas.

Patente	Resultados			
	Mobilidade	Circuitos	Elos	Juntas
US5855387	3	4	12	15
US6547206B1	2	1	5	5
US6979010B1	2	1	5	5
US7597163B2	1	4	10	13
US8011680B2	3	1	6	6
US20120013098A1	1	2	6	7
EP2689762A1	4	3	11	13
US4861056	3	2	8	9
US6237889	2	1	5	5
US6796568	1	2	6	7
US6412804B1	1	2	6	7

Fonte: do Autor.

Além da análise das patentes, ainda é importante lembrar que temos outros dois critérios a serem considerados:

- Não resultar em cadeias degeneradas (fracionadas ou subcadeias de *Baranov*);
- Não resultar em isomorfismos.

Após análise das estruturas, o mecanismo proposto foi então dividido em duas partes. Na primeira análise, a estrutura representa a visão frontal da suspensão, assim, leva em consideração um mecanismo planar ($\lambda = 3$), com duas mobilidades ($M = 2$) e estruturas compostas por um, dois ou três circuitos ($\nu = 1$, $\nu = 2$ ou $\nu = 3$). O próximo passo é o desenvolvimento da Síntese do Número, que será explicada e resolvida no próximo subcapítulo.

4.2.3 Síntese do Número

A Síntese do Número visa determinar a quantidade de elos, juntas e elementos de par cinemático de acordo com os requisitos estruturais fornecidos. Ainda, determinar todas as partições possíveis de serem geradas para n e e calculados. Também, determinar as variações possíveis

para cada partição encontrada e as inversões possíveis para cada variação encontrada.

Como a quantidade de resultados tende a crescer muito rápido ao se aumentar os valores dos requisitos, foram determinados requisitos com cautela, que visavam atender a não complexidade do sistema de suspensão, pelo pequeno espaço de trabalho e foco na facilidade de fabricação e manutenção. Os resultados inviáveis já foram descartados através dos requisitos e os passos seguintes mostram os mecanismos possíveis encontrados.

Para o primeiro caso ($v = 1$), a Tabela 4 mostra as opções possíveis de partições que resultam em $j = 5$ e $n = 5$.

Tabela 4 – Partições com $M = 2$ e $v = 1$.

	Elos				
Partição	1	2	3	4	5
1	2	2	2	2	2

Fonte: do Autor.

Desta forma, apenas uma combinação de elos é possível com estas especificações de projeto. A Figura 51 mostra tal estrutura.

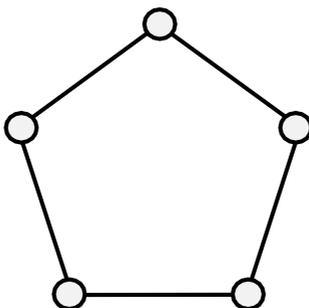


Figura 51 – Cadeia cinemática com $M = 2$ e $v = 1$.

Fonte: do Autor.

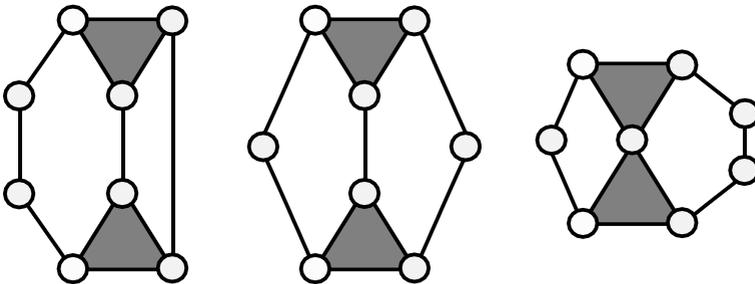
Seguindo a sequência, para o segundo caso ($v = 2$), temos na Tabela 5 as opções possíveis de partições que tem como resultado $j = 8$ e $n = 7$.

Tabela 5 – Partições com $M = 2$ e $\nu = 2$.

Partição	Elos						
	1	2	3	4	5	6	7
1	4	2	2	2	2	2	2
2	3	3	2	2	2	2	2

Fonte: do Autor.

Descartando cadeias degeneradas e fracionamento de elos por não serem interessantes a este projeto, três combinações de elos são possíveis a partir da segunda partição com estas especificações. A Figura 52 mostra tais estruturas.

Figura 52 – Cadeias cinemáticas (Partição 2) com $M = 2$ e $\nu = 2$.

Fonte: do Autor.

Para o terceiro caso ($\nu = 3$) temos a Tabela 6, que mostra as opções possíveis combinações de partições que resultam em $j = 11$ e $n = 9$.

Tabela 6 – Partições com $M = 2$ e $\nu = 3$.

Partição	Elos								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	6	2	2	2	2	2	2	2	2
2	5	3	2	2	2	2	2	2	2
3	4	4	2	2	2	2	2	2	2
4	4	3	3	2	2	2	2	2	2
5	3	3	3	3	2	2	2	2	2

Fonte: do Autor.

Seguindo os mesmos passos que no primeiro e segundo casos, com estas especificações, 38 combinações de elos são possíveis, divididas de acordo com as partições. As Figuras 53, 54, 55 e 56 mostram tais estruturas, de acordo com as partições previamente estabelecidas.

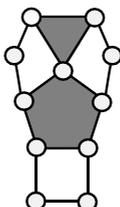


Figura 53 – Cadeia cinemática (Partição 2) com $M = 2$ e $v = 3$.

Fonte: do Autor.

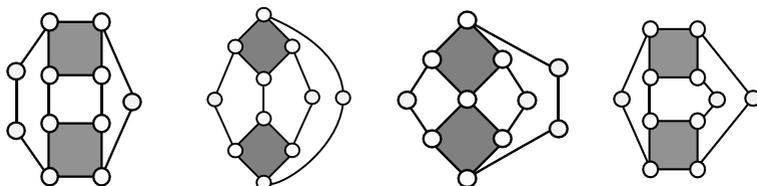


Figura 54 – Cadeias cinemáticas (Partição 3) com $M = 2$ e $v = 3$.

Fonte: do Autor.

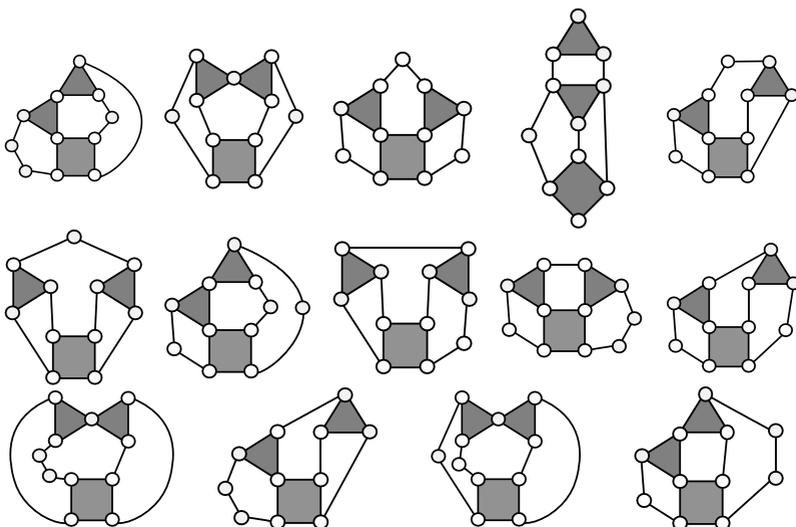


Figura 55 – Cadeias cinemáticas (Partição 4) com $M = 2$ e $v = 3$.

Fonte: do Autor.

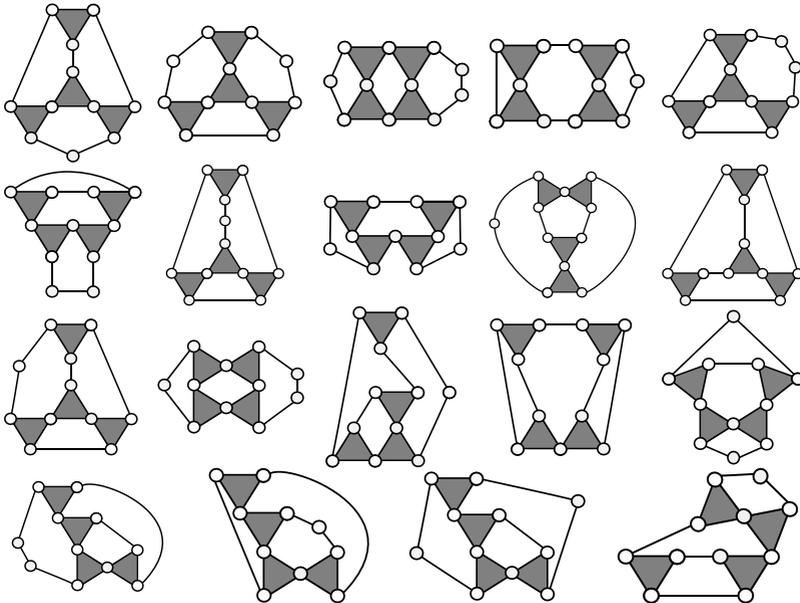


Figura 56 – Cadeias cinemáticas (Partição 5) com $M = 2$ e $v = 3$.
Fonte: do Autor.

Depois de serem encontradas as partições possíveis, o próximo passo seria encontrar todas as variações possíveis. A Variação é o modo na qual os elos de uma partição podem ser conectados uns aos outros para formar a cadeia cinemática. Quando são determinadas todas as variações, temos todas as possíveis cadeias cinemáticas. Os resultados mostrados nas Figuras 53, 54, 55 e 56 (com a utilização do software *Sagemath*®) já incluem as variações possíveis procuradas, deste modo, podemos passar para o último passo da Síntese do Número, que é a determinação das inversões possíveis.

A Inversão é uma associação de um referencial fixo à um dos elos da cadeia cinemática. Quando são determinadas todas as inversões possíveis de uma cadeia, determinam-se todos os mecanismos possíveis de serem desenvolvidos. Nesta etapa, os elos serão numerados de modo a mostrar quais deles são possíveis de serem fixados, levando-se em consideração os critérios funcionais previamente estabelecidos, principalmente a simetria. As Figuras 57, 58 e 59 mostram os mecanismos, separados de acordo com o número de circuitos.

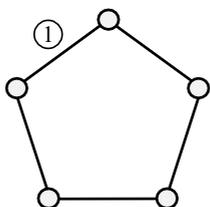


Figura 57 – Inversão da cadeia cinemática com $M = 2$ e $v = 1$.
 Fonte: do Autor.

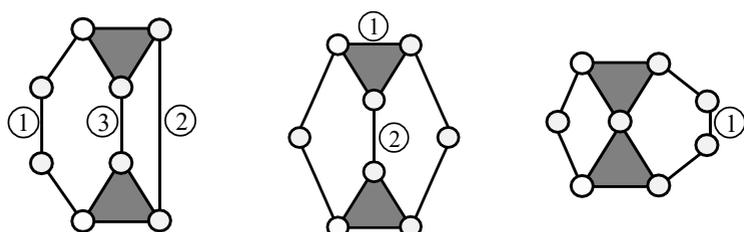
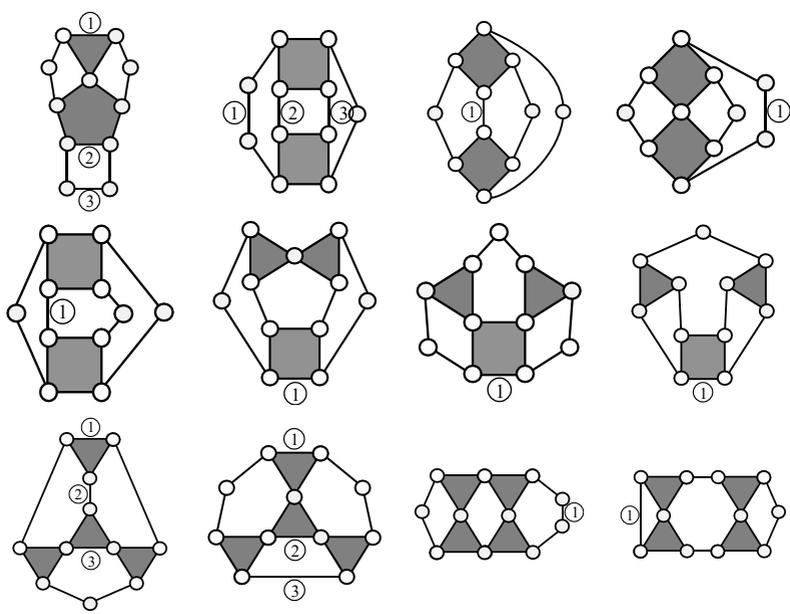


Figura 58 – Inversões das cadeias cinemáticas com $M = 2$ e $v = 2$.
 Fonte: do Autor.



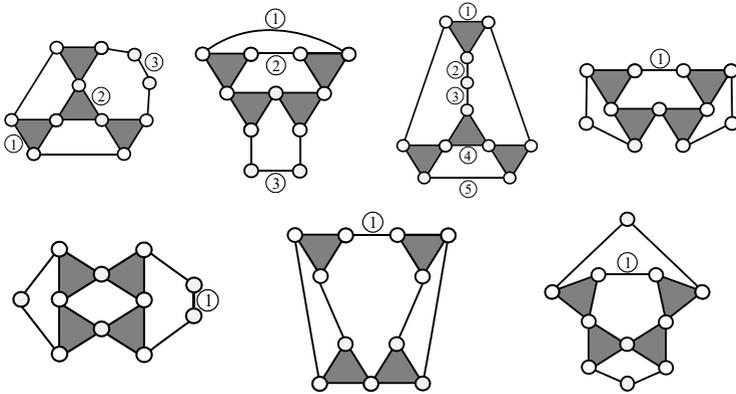


Figura 59 – Inversões das cadeias cinemáticas com $M = 2$ e $\nu = 3$.

Fonte: do Autor.

Aplicada a Inversão, levando também em consideração os critérios estabelecidos anteriormente, podemos concluir que das 42 cadeias encontradas, apenas 23 são possíveis de serem aplicadas neste estudo. O próximo passo para filtrar ainda mais cadeias é o desenvolvimento da Síntese do Tipo, que será mostrada no próximo subcapítulo deste trabalho.

4.2.4 Síntese do Tipo

A Síntese do Tipo visa determinar qual o tipo de cada par cinemático do mecanismo: juntas de revolução (R), prismáticas (P), entre outras. Os pares sempre devem satisfazer às restrições do espaço de trabalho. Para a fabricação, quando for o caso, processos existentes podem afetar na escolha dos pares devido a disponibilidade e viabilidade econômica. E ainda, quando for o caso, o mecanismo deve ser de fácil manutenção, com pares simples de serem substituídos. A utilização de pares superiores normalmente é mais crítica, pela manutenção excessiva, por isso o recomendado é utilizar pares inferiores.

Algumas características ainda devem ser levadas em consideração para a síntese:

- Mecanismos gerados possuem pares cinemáticos com conectividade de par unitária.
- Utilizar apenas pares com $f_i = 1$, ou fazer a contração de par cinemático.

- Com os tipos disponíveis definidos, deve-se atribuir aos pares todos os tipos possíveis (análise combinatória).
- Recomenda-se eliminar a maior quantidade de tipos de pares, com o auxílio dos requisitos de projeto.

Definida a síntese, a suspensão tem o propósito de absorver impactos melhorando a estabilidade, controle e conforto com a redução da vibração do sistema. O princípio da estrutura do amortecedor substitui os elos na cadeia cinemática, criando por exemplo, um sistema RPR (junta rotativa – junta prismática – junta rotativa). A Figura 60 ilustra como é feita essa substituição. Vale ressaltar que as juntas das pontas da estrutura não precisam ser necessariamente de revolução.

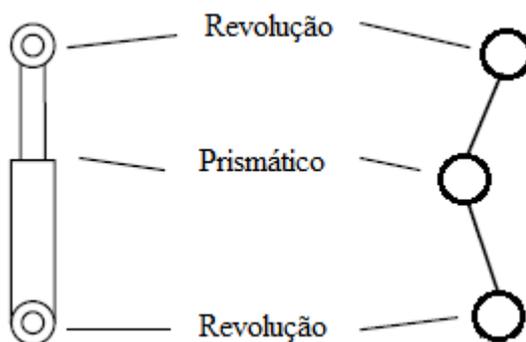


Figura 60 – Estrutura do amortecedor na cadeia cinemática.

Fonte: do autor.

Dois amortecedores devem ser acoplados às cadeias, para que o sistema da suspensão visto de frente esteja completo. O restante da estrutura será composto por pares diversos que serão mostrados no decorrer deste item. Desta forma, dos mecanismos analisados, oito são os restantes e possíveis para aplicação. As estruturas são mostradas na Figura 61.

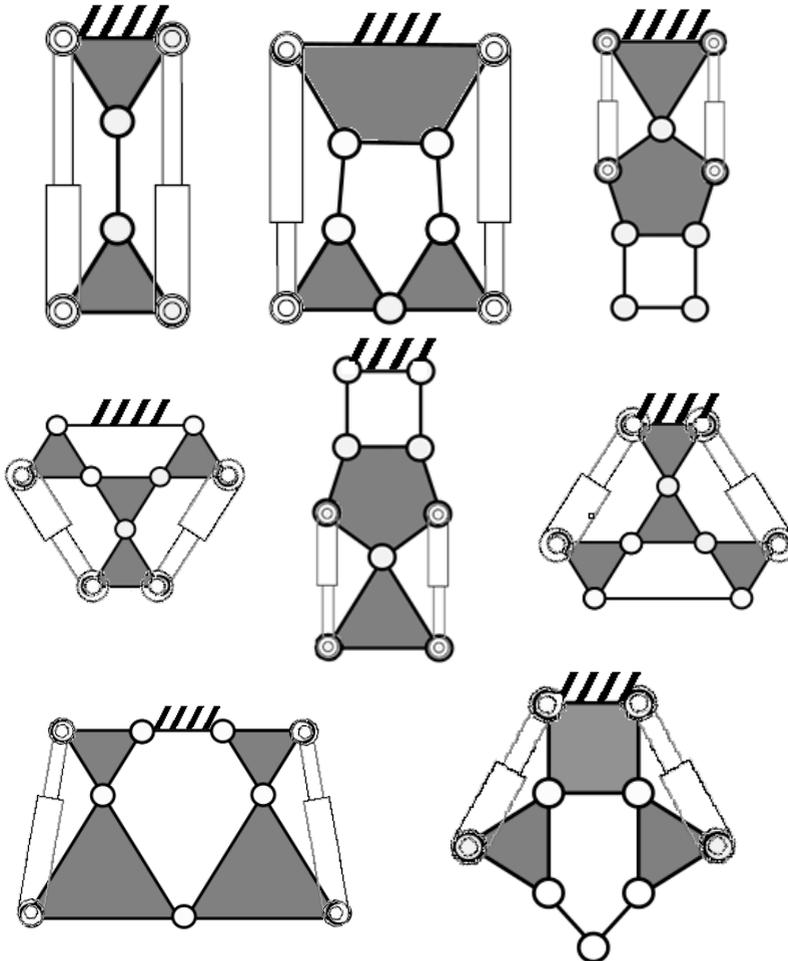


Figura 61 – Mecanismos possíveis para a suspensão.
 Fonte: do autor.

Pela questão de o mecanismo ter que ser de fácil fabricação, instalação e manutenção, o escolhido para suprir os requisitos preestabelecidos é o mais simples dos possíveis. Está ilustrado na Figura 62, juntamente com a especificação das juntas utilizadas para ligar os elos da estrutura.

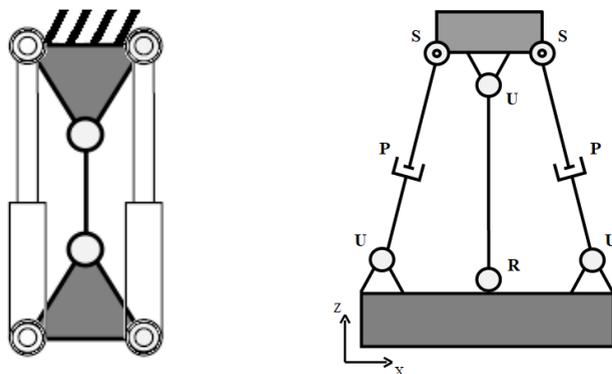


Figura 62 – Mecanismo vista frontal da suspensão.

Fonte: do autor.

Feita a análise e escolha da primeira parte do mecanismo, analisado de forma planar ($\lambda = 3$), vista frontal ($M = 2$), passamos agora para a vista lateral, que irá adicionar 1 GDL a suspensão, possibilitando o balanço faltante e respeitando o critério funcional de que a estrutura deverá possuir três mobilidades ($M = 3$).

A estrutura a ser inserida é um mecanismo semelhante ao 4 barras, devido a simplicidade e por atender aos requisitos faltantes. Nesta etapa não são necessárias as análises e sínteses, pois, esta estrutura é a escolha ideal. Na estrutura será inserido outro amortecedor, para que suavize os movimentos da cadeira. A Figura 63 mostra o mecanismo com o amortecedor, juntamente com a especificação das juntas.

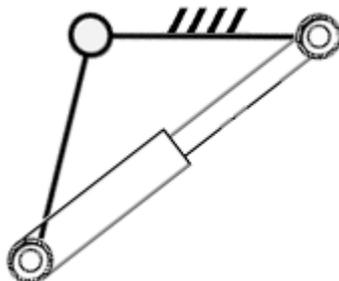


Figura 63 – Mecanismo com 1 GDL e amortecimento.

Fonte: do autor.

O que devemos observar com atenção é que a estrutura corresponde a vista lateral da suspensão. Assim, o elo superior (fixo) representa o assento da cadeira, e o outro elo, representa a estrutura do mecanismo da primeira parte da suspensão visto de lado, que foi descrito anteriormente.

Sendo assim, podemos finalmente juntar os dois mecanismos escolhidos, formando uma montagem 3D que é a estrutura completa da suspensão. As Figuras 64, 65, 66 e 67 mostram com detalhes como ficou a estrutura e também de que maneira ela será encaixada na estrutura da cadeira de rodas.

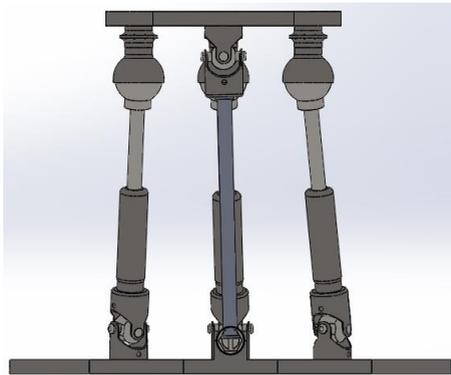


Figura 64 – Vista frontal da suspensão proposta.

Fonte: do autor.

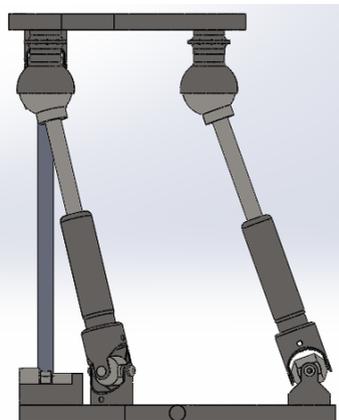


Figura 65 – Vista lateral suspensão proposta.

Fonte: do autor.

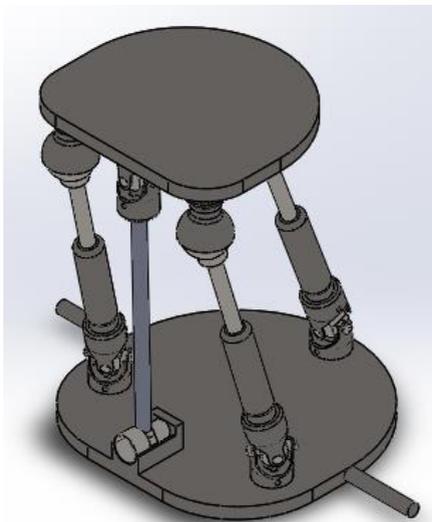


Figura 66 – Vista isométrica suspensão proposta.
Fonte: do autor.

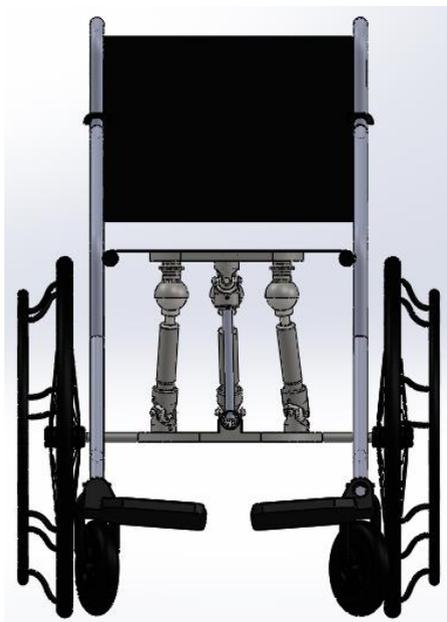


Figura 67 – Suspensão proposta acoplada a cadeira de rodas.
Fonte: do autor.

4.3 Considerações do Capítulo

Este Capítulo trouxe as etapas para definição do protótipo final, objetivo deste trabalho. Foram definidos critérios estruturais e funcionais, com base nas diretrizes de projeto, para que depois fossem desenvolvidas as sínteses do número e do tipo, para que finalmente se pudesse chegar no conceito proposto.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Esta dissertação apresentou um estudo detalhado sobre mecanismos de suspensão utilizados em veículos de pequeno porte, com foco principal naqueles utilizados em cadeiras de rodas manuais. As diretrizes do projeto foram obtidas através de algumas das ferramentas utilizadas com o auxílio da metodologia de projeto desenvolvida pela Universidade. Com as diretrizes, foi possível sintetizar mecanismos viáveis e escolher o ideal para o resultado esperado com o trabalho.

5.1 Conclusões

De acordo com a Revisão Bibliográfica, pôde ser abordada a problemática principal que esta dissertação visava suprir. Também, foi feito um mapeamento detalhado de todos os mecanismos e produtos existentes no mercado que pudessem ser relevantes na criação do objetivo principal deste trabalho. E ainda, mostradas as etapas seguidas na busca de patentes, ferramenta muito importante para o entendimento e síntese de mecanismos. Por fim, foi descrita a Teoria de Mecanismos e as metodologias utilizadas para desenvolvimento de mecanismos. A pesquisa ajudou a pontuar defeitos e melhorias possíveis nas estruturas, além de mostrar a possibilidade de aplicar a metodologia de síntese de mecanismos na criação e novos produtos.

Feita a análise do estado da arte, foram selecionadas as patentes que mais se adequavam ao estudo e as representações estruturais foram criadas. Em paralelo, a pesquisa de mercado buscou produtos disponíveis no mercado e foram analisadas as estruturas das suspensões para obtenção de detalhes do funcionamento. Finalmente, foram descritas algumas considerações de projeto (dimensionamento, peso, material, funções, mobilidade e aplicabilidade) que são importantes e foram consideradas no desenvolvimento da última parte do trabalho.

Com o esboço inicial da estrutura, foram estabelecidos os critérios funcionais e estruturais necessários para que se chegasse na melhor solução possível para a pesquisa. Foram realizadas a Síntese do Número e a Síntese do Tipo, com o mecanismo sendo dividido em duas etapas. Por fim, foi escolhida a melhor opção de estrutura para a suspensão e um protótipo foi desenhado e mostrado.

Tomando-se toda a estrutura da dissertação descrita em detalhes, pode-se dizer que os objetivos principal e secundários deste trabalho

foram alcançados. O próximo item trará sugestões para obtenção de resultados ainda mais satisfatórios.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Para perspectivas de trabalhos futuros, podem-se indicar as seguintes tarefas:

- Realizar síntese dimensional para melhor adequação do produto ao espaço limitado de trabalho, além de encontrar o encaixe mais adequado das duas estruturas que compõem a suspensão.
- Desenvolver uma peça extra para encaixe da suspensão a estrutura do maior número possível de modelos de cadeiras de rodas.
- Realizar simulações para descobrir se o protótipo realmente atinge níveis satisfatórios de diminuição de vibração.
- Fabricar o produto e fazer testes reais para verificar os níveis de vibração e níveis de conforto.

REFERÊNCIAS

- [1] APPALA, Tharakeshwar; GHOSAL, Ashitava. A mobile robot with a two-degree-of-freedom suspension for traversing uneven terrain with minimal slip: Modeling, simulation and experiments. **Mechanism and Machine Theory**, v. 93, p. 83-97, 2015.
- [2] BACK, N.; OGLIARI, A.; DIAS, A.; SILVA, J. C. da. **Projeto integrado de produtos: planejamento, concepção e modelagem**. Barueri: Manole, 2008. 601 p.
- [3] BARONIO, Gabriele et al. Gölem project: Concept and design of a trekking/hiking wheelchair. **Advances in Mechanical Engineering**, v. 9, n. 11, p. 1687814017730541, 2017.
- [4] BAUMGARTNER, Herbert Thomas. **System and methods for a vehicle with an articulating suspension exploration platform with shock dampening**. U.S. Patent n. 18/0079,276 22 mar. 2018.
- [5] BISCHOFF, Eric. **Seat suspension assembly**. U.S. Patent n. 6,237,889, 29 maio 2001.
- [6] BURNS, Stephen P.; BETZ, Kendra L. Seating pressures with conventional and dynamic wheelchair cushions in tetraplegia. **Archives of physical medicine and rehabilitation**, v. 80, n. 5, p. 566-571, 1999.
- [7] CHELGREN, Eric Mark. **Wheelchair suspension system**. U.S. Patent n. 8,011,680, 6 set. 2011.
- [8] COOPER, Rory A. et al. Seat and footrest shocks and vibrations in manual wheelchairs with and without suspension. **Archives of physical medicine and rehabilitation**, v. 84, n. 1, p. 96-102, 2003.
- [9] DE AJUDAS TÉCNICAS, Comitê. Tecnologia assistiva. **Brasília: Corde**, 2009.

- [10] DICKIE, Paul C. **Seat suspension for wheelchair**. U.S. Patent n. 6,547,206, 15 abr. 2003.
- [11] DIGIOVINE, Carmen P. et al. Analysis of vibration and comparison of four wheelchair cushions during manual wheelchair propulsion. In: **Proceedings of the annual RESNA conference**. 2000. p. 242-244.
- [12] DIGIOVINE, Michalle M. et al. User assessment of manual wheelchair ride comfort and ergonomics. **Archives of Physical Medicine and Rehabilitation**, v. 81, n. 4, p. 490-494, 2000.
- [13] DIGNAT, M. Yves. **Wheelchair with improved suspension**. U.S. Patent n. 6,412,804, 2 jul. 2002.
- [14] DUFFY JR, George Y.; FLUM, Ted O. **Folding wheelchair with improved frame and suspension system**. U.S. Patent n. 4,861,056, 29 ago. 1989.
- [15] EATHAKOTA, Vijay P.; SINGH, Arun K.; KRISHNA, K. Madhava. Two models of force actuator based active suspension mechanisms for mobility on uneven terrain. **Acta Astronautica**, v. 67, n. 9-10, p. 1233-1247, 2010.
- [16] FAN, Caixia; LIU, Hongzhao; ZHANG, Yanbin. Type synthesis of 2T2R, 1T2R and 2R parallel mechanisms. **Mechanism and Machine Theory**, v. 61, p. 184-190, 2013.
- [17] FERRIOL, Pierre; ODIN, Jean-Christophe. **Moyen de transport tout terrain pour personnes à motricité déficiente**. F.R. Patent n. 2,689,762, 12 jul. 2013.
- [18] GARCIA-MENDEZ, Yasmin et al. Health risks of vibration exposure to wheelchair users in the community. **The journal of spinal cord medicine**, v. 36, n. 4, p. 365-375, 2013.
- [19] GILL, Robert; HUDSON, John R. **Wheel chair with independent suspension**. U.S. Patent n. 5,855,387, 5 jan. 1999.

- [20] GOERTZEN, Gerold; NULL JR, William A. **Obstacle traversing wheelchair**. U.S. Patent n. 7,597,163, 6 out. 2009.
- [21] GUNSTON, T. P.; REBELLE, J.; GRIFFIN, M. J. A comparison of two methods of simulating seat suspension dynamic performance. **Journal of Sound and Vibration**, v. 278, n. 1-2, p. 117-134, 2004.
- [22] HART, Harlan H. **Wheelchair modular rear suspension**. U.S. Patent n. 12/0013,098 19 jan. 2012.
- [23] HARTENBERG, Richard S.; DENAVIT, Jacques. **Kinematic Synthesis of Linkages**. New York: McGraw-Hill, 1964.
- [24] HERRERO, Saioa et al. Analysis of the 2PRU-1PRS 3DOF parallel manipulator: kinematics, singularities and dynamics. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 51, p. 63-72, 2018.
- [25] HISCHKE, Molly; REISER II, Raoul F. Effect of Rear Wheel Suspension on Tilt-in-Space Wheelchair Shock and Vibration Attenuation. **PM&R**, 2018.
- [26] HOSTENS, Ivo et al. A study of vibration characteristics on a luxury wheelchair and a new prototype wheelchair. **Journal of sound and vibration**, v. 266, n. 3, p. 443-452, 2003.
- [27] HU, Bo et al. Statics and stiffness model of serial-parallel manipulator formed by k parallel manipulators connected in series. **Journal of Mechanisms and Robotics**, v. 4, n. 2, p. 021012, 2012.
- [28] IBGE. **Pesquisa Nacional de Saúde 2013: percepção do estado de saúde, estilos de vida e doenças crônicas**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2015.
- [29] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 2631**: Guia para avaliação da

- exposição humana à vibrações de corpo inteiro. 2 ed., 1978. 16 p.
- [30] JIN, Xiaodong et al. A class of novel 2T2R and 3T2R parallel mechanisms with large decoupled output rotational angles. **Mechanism and Machine Theory**, v. 114, p. 156-169, 2017.
- [31] KIM, Sung Mok et al. Implementation of a revolute-joint-based asymmetric Schönflies motion haptic device with redundant actuation. **Mechatronics**, v. 50, p. 87-103, 2018.
- [32] KWAPIS, Randal J. **Sport utility wheelchair**. U.S. Patent n. 6,979,010, 27 dez. 2005.
- [33] KWARCIAK, Andrew M.; COOPER, Rory A.; FITZGERALD, Shirley G. Curb descent testing of suspension manual wheelchairs. **Journal of Rehabilitation Research & Development**, v. 45, n. 1, 2008.
- [34] KWARCIAK, Andrew M. et al. Fatigue testing of selected suspension manual wheelchairs using ANSI/RESNA standards. **Archives of physical medicine and rehabilitation**, v. 86, n. 1, p. 123-129, 2005.
- [35] LIU, Xin-Jun et al. A novel spatial three degrees of freedom parallel manipulator. **IFAC Proceedings Volumes**, v. 34, n. 4, p. 293-298, 2001.
- [36] MACIEJEWSKI, I.; GLOWINSKI, S.; KRZYZYNSKI, T. Active control of a seat suspension with the system adaptation to varying load mass. **Mechatronics**, v. 24, n. 8, p. 1242-1253, 2014.
- [37] MAEDA, Setsuo et al. Relationship between questionnaire survey results of vibration complaints of wheelchair users and vibration transmissibility of manual wheelchair. **Environmental health and preventive medicine**, v. 8, n. 3, p. 82-89, 2003.

- [38] MALETZ, E. R. **Crêterios funcionais e estruturais para a síntese de mecanismos para movimentar pacientes acamados**. Disserta o (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-gradua o em Engenharia Mecânica, 2017.
- [39] MARTIS, Charles J.; SMITH, Mark E.; MULHERN, James P. **Suspension system for a wheelchair**. U.S. Patent n. 6,796,568, 28 set. 2004.
- [40] MENDES, Rodrigo Bicalho; DE SALLES TIBURCIO, T lio Marcio. Cadeira de rodas manual: o impacto dos problemas relacionados a tecnologia assistiva na melhoria da qualidade de vida de pessoas com mobilidade reduzida. **ARTEFACTUM-Revista de estudos em Linguagens e Tecnologia**, v. 12, n. 1, 2016.
- [41] MURAI, E. H. **Projeto de mecanismos de costura com acesso unilateral usando síntese do número e do tipo**. Disserta o (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-gradua o em Engenharia Mecânica, 2013.
- [42] NASU, Shota; WADA, Masayoshi. Mechanical design of an active-caster robotic drive with dual-wheel and differential mechanism. In: **Industrial Electronics Society, IECON 2015-41st Annual Conference of the IEEE**. IEEE, 2015. p. 005345-005350.
- [43] NBR, ABNT. 9050, 1994. acessibilidade de pessoas portadoras de deficiência a edifica es, espaço, mobili rio e equipamento urbano. **Rio de Janeiro: ABNT**, 2001.
- [44] NING, Donghong et al. Active control of an innovative seat suspension system with acceleration measurement based friction estimation. **Journal of Sound and Vibration**, v. 384, p. 28-44, 2016.

- [45] RAMBAUD, Pascal. **Vehicle having a chassis and a pendulum nacelle**. U.S. Patent Application n. 15/304,700, 16 fev. 2017.
- [46] REQUEJO, Philip S. et al. Effect of rear suspension and speed on seat forces and head accelerations experienced by manual wheelchair riders with spinal cord injury. **Journal of Rehabilitation Research & Development**, v. 45, n. 7, 2008.
- [47] ROEHR, Thomas M.; CORDES, Florian; KIRCHNER, Frank. Reconfigurable integrated multirobot exploration system (RIMRES): heterogeneous modular reconfigurable robots for space exploration. **Journal of Field Robotics**, v. 31, n. 1, p. 3-34, 2014.
- [48] SARTORETTO, M. L.; BERSCH, R. Categorias de Tecnologia Assistiva. **Assistiva Tecnologia e Educação**, 2014. Disponível em: <<http://www.assistiva.com.br/tassistiva.html#categorias>>. Acesso em: 07 mai. 2018.
- [49] SIMONI, R. **Síntese estrutural de cadeias cinemáticas e mecanismos**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, 2008.
- [50] STEIN, G. J.; MÚČKA, P. Study of simultaneous shock and vibration control by a fore-and-aft suspension system of a driver's seat. **International Journal of Industrial Ergonomics**, v. 41, n. 5, p. 520-529, 2011.
- [51] TSAI, Lung W. Mechanism Design: **Enumeration of Kinematic Structures According to Function**. Washington, D.C.: Mechanical Engineering series, CRC Press, 2000.
- [52] VANSICKLE, David P. et al. Analysis of vibrations induced during wheelchair propulsion. **J Rehabil Res Dev**, v. 38, n. 4, p. 409-21, 2001.

- [53] VIRTUOSO, Eduardo. **A cidade deficiente: o direito à cidade e a acessibilidade no cotidiano dos cadeirantes**. 2016. 71 f. TCC (Graduação) - Curso de Geografia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.
- [54] XU, Lingmin et al. Tex3: An 2R1T Parallel Manipulator with Minimum DOF of Joints and Fixed Linear Actuators. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing**, v. 19, n. 2, p. 227-238, 2018.
- [55] XU, Yundou et al. A method for force analysis of the overconstrained lower mobility parallel mechanism. **Mechanism and Machine Theory**, v. 88, p. 31-48, 2015.
- [56] WANG, Jinsong; LIU, Xin-Jun. Analysis of a novel cylindrical 3-DoF parallel robot. **Robotics and Autonomous Systems**, v. 42, n. 1, p. 31-46, 2003.
- [57] WOLF, Erik J. et al. Using the absorbed power method to evaluate effectiveness of vibration absorption of selected seat cushions during manual wheelchair propulsion. **Medical engineering & physics**, v. 26, n. 9, p. 799-806, 2004.
- [58] YAN, Hong-Sen. **Creative Design of Mechanical Devices**. Singapore: Springer, 1999.
- [59] ZHANG, Yanbin et al. Type synthesis of uncoupled translational parallel manipulators based on actuation wrench screw theory. **Advances in Mechanical Engineering**, v. 10, n. 1, p. 1687814017748436, 2018.

APÊNDICE A – GERAÇÃO DE GRAFOS $M = 2$ E $\nu = 1$

Neste apêndice é mostrado o código do software *Sagemath*® para geração de grafos com $j = 5$ e $n = 5$.

```
#Geração de grafos
G=list(graphs.nauty_geng("5 5:5 -C -t"))
print 'Número gerado'
print len(G)

G=list(graphs.nauty_geng("5 5:5 -C -t"))
planar=[g.is_planar(set_pos=True) for g in G]
print G[0].graph6_string()
```

APÊNDICE B – GERAÇÃO DE GRAFOS $M = 2$ E $\nu = 2$

Neste apêndice é mostrado o código do software *Sagemath*® para geração de grafos com $j = 8$ e $n = 7$.

```
#Geração de grafos
G=list(graphs.nauty_geng("7 8:8 -C -t"))
print 'Número gerado'
print len(G)

G=list(graphs.nauty_geng("7 8:8 -C -t"))
planar=[g.is_planar(set_pos=True) for g in G]
print G[0].graph6_string()
print G[1].graph6_string()
print G[2].graph6_string()
```

APÊNDICE C – GERAÇÃO DE GRAFOS $M = 2$ E $\nu = 3$

Neste apêndice é mostrado o código do software *Sagemath*® para geração de grafos com $j = 11$ e $n = 9$.

```
#Geração de grafos
G=list(graphs.nauty_geng("9 11:11 -C -t"))
print 'Número gerado'
print len(G)

G=list(graphs.nauty_geng("9 11:11 -C -t"))
planar=[g.is_planar(set_pos=True) for g in G]
print G[0].graph6_string()
print G[1].graph6_string()
print G[2].graph6_string()
print G[3].graph6_string()
print G[4].graph6_string()
print G[5].graph6_string()
print G[6].graph6_string()
print G[7].graph6_string()
print G[8].graph6_string()
print G[9].graph6_string()
print G[10].graph6_string()
print G[11].graph6_string()
print G[12].graph6_string()
print G[13].graph6_string()
print G[14].graph6_string()
print G[15].graph6_string()
print G[16].graph6_string()
print G[17].graph6_string()
print G[18].graph6_string()
print G[19].graph6_string()
print G[20].graph6_string()
print G[21].graph6_string()
print G[22].graph6_string()
print G[23].graph6_string()
print G[24].graph6_string()
print G[25].graph6_string()
```

```
print G[26].graph6_string()
print G[27].graph6_string()
print G[28].graph6_string()
print G[29].graph6_string()
print G[30].graph6_string()
print G[31].graph6_string()
print G[32].graph6_string()
print G[33].graph6_string()
print G[34].graph6_string()
print G[35].graph6_string()
print G[36].graph6_string()
print G[37].graph6_string()
```