



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Engenharia Mecânica

ÁQUILA CHAGAS DE CARVALHO

Modelagem e análise de módulo propulsor de cadeira de rodas

CAMPINAS

2023

ÁQUILA CHAGAS DE CARVALHO

Modelagem e análise de módulo propulsor de cadeira de rodas

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, na Área de Mecânica dos Sólidos e Projeto Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Franco Giuseppe Dedini

Coorientador: Dr. Fabio Mazzariol Santiciolli

ESTE TRABALHO CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELO ALUNO ÁQUILA CHAGAS DE CARVALHO, E ORIENTADA PELO PROF. DR. FRANCO GIUSEPPE DEDINI.

**CAMPINAS
2023**

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

C253m Carvalho, Áquila Chagas de, 1989-
Modelagem e análise de módulo propulsor de cadeira de rodas / Áquila Chagas de Carvalho. – Campinas, SP : [s.n.], 2023.

Orientador: Franco Giuseppe Dedini.

Coorientador: Fabio Mazzariol Santiciolli.

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Cadeira de rodas. 2. Motores elétricos - Controle eletrônico. 3. Pneus. 4. Modelagem matemática e simulação. 5. Tecnologia assistiva. I. Dedini, Franco Giuseppe, 1957-. II. Santiciolli, Fabio Mazzariol, 1989-. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. IV. Título.

Informações Complementares

Título em outro idioma: Modeling and analysis of wheelchair propulsion module

Palavras-chave em inglês:

Wheelchair

Electric motors - Electronic control

Tires

Mathematical modeling and simulation

Assistive technology

Área de concentração: Mecânica dos Sólidos e Projeto Mecânico

Titulação: Mestre em Engenharia Mecânica

Banca examinadora:

Franco Giuseppe Dedini [Orientador]

Marcelo Becker

Eduardo Paiva Okabe

Data de defesa: 17-02-2023

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Mecânica

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0001-6689-5597>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/6458736585786644>

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO

**Modelagem e análise de módulo propulsor de
cadeira de rodas**

Autor: Áquila Chagas de Carvalho

Orientador: Prof. Dr. Franco Giuseppe Dedini

Coorientador: Dr. Fabio Mazzariol Santiciolli

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:

Prof. Dr. Franco Giuseppe Dedini, Presidente
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP

Prof. Dr. Marcelo Becker
Escola de Engenharia de São Carlos - EESC USP

Prof. Dr. Eduardo Paiva Okabe
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP

A Ata de Defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na Secretaria do Programa da Unidade.

Campinas, 17 de fevereiro de 2023.

Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus pais e irmãos, que sempre estiveram ao meu lado, incentivando e apoiando todas as etapas.

Obrigado por existirem na minha vida.

Agradecimentos

A Deus por todas as oportunidades abertas na minha vida, para a contínua realização de tudo que sempre quis fazer da vida, desde criança, mesmo antes de saber o nome e, aos poucos e com o passar dos anos tomou forma e nome, Engenharia Mecânica.

Aos meus pais, Nilton Dutra de Carvalho e Ivete Chagas Freitas de Carvalho, por todo apoio e carinho. Vocês são muito especiais.

Aos meus irmãos, Priscila Chagas e Miquéias Nilton, pelo carinho e companheirismo que sempre tiveram.

Ao meu orientador Prof. Dr. Franco Giuseppe Dedini, o qual comecei admirar pelos seus trabalhos publicados antes mesmo de conhecê-lo pessoalmente. Já durante o período de mestrado, só tenho a agradecer por tudo aprendi sobre engenharia e um pouco mais sobre a vida sob seu ponto de vista.

Ao meu coorientador Dr. Fabio Mazzariol Santiciolli, só tenho a agradecer pela grata oportunidade de poder ter aprendido um pouco de muita coisa que me ensinou, muito feliz pela parceria e amizade desenvolvida nesse período.

À Profa. Dra. Ludmila Corrêa de Alkmin e Silva, pelo apoio, incentivo e todos os ensinamentos durante o período do mestrado, além da parceria nos projetos de pesquisa.

A todos os colegas do LabSIn, em especial a Samuel Filgueira, por ter sido tão generoso e paciente, tanto com seus ensinamentos, como nos conselhos, também a Jony Eckert, Maria Augusta Lourenço, Nathália Pinheiro, Fabrício Silva, Jéssica Gentile e Matheus Miranda e Rafael Kawano.

À minha namorada, Aline Coelho de Almeida, pelo apoio incondicional durante essa fase da minha vida.

À Profa. Dra. Paula Frassinetti Cavalcante, pelo apoio e incentivo de trilhar novos desafios e buscar maior capacitação profissional, além da grande amizade firmada desde a graduação.

Aos meus amigos Leonardo Gusmão, Carlos Eduardo, João Pedro e amiga Mônica Lima. Todos vocês apostam demais no meu sucesso, isso torna meu dia a dia mais fortalecido.

Às Secretarias de Graduação e Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica (FEM), pelo apoio e suporte.

O presente trabalho foi realizado com apoio da PETROBRAS, processo nº 5445.1.

Resumo

As cadeiras de rodas são em sua maioria boas soluções para os usuários que apresentam algum tipo de lesão medular ou processo degenerativo, que afeta o movimento em caráter temporário ou permanente dos membros inferiores ou em algum grau dos membros superiores. A cadeira de rodas simples é, em geral, a primeira escolha para usuário com restrição de movimento, mas que mesmo assim exige a propulsão manual. No entanto, é representativo o número de pacientes que apresentam algum tipo de dificuldade no controle motor dos membros superiores ou mesmo na restrição de força suficiente para gerar a propulsão de uma cadeira de rodas manual. Para essas pessoas, uma possível solução seria utilizar cadeiras de rodas motorizadas, entretanto essas são de alto custo e peso, o que limita bastante a aquisição. Como uma alternativa de custo acessível e de flexibilidade de montagem e desmontagem do módulo de propulsão à cadeira de rodas, esse trabalho apresenta uma solução de conversão de uma cadeira de rodas manual em uma cadeira de rodas motorizadas através do acoplamento do kit de motorização, com característica de fácil instalação, operação e transporte. Este projeto apresenta a criação de um módulo propulsor baseado tanto na continuação dos trabalhos do grupo de pesquisa do Laboratório de Sistemas Integrados como também de uma ampla pesquisa sobre configurações de motorização de cadeiras de rodas. O sistema de propulsão foi desenvolvido para menor alteração possível na cadeira de rodas manual. A validação dos resultados obtidos nas simulações de controle da cadeira de rodas foi proveniente da co-simulação dos programas de computação numérica (MATLAB/Simulink[®]) e análise de sistemas dinâmicos multicorpos (MSC.ADAMS[®]). Todo esse processo foi resultado da aplicação do estudo de viabilidade do projeto. Foram obtidas quatro soluções promissoras de motorização de cadeira de rodas, sendo que uma das soluções foi detalhada em modelo matemático e foi construído um protótipo físico para o teste das características estudadas.

Palavras Chave: Kit de motorização, Cadeira de rodas motorizadas, Modelagem de Contato, Modelo dinâmico de cadeira de rodas motorizada, Tecnologia assistiva.

Abstract

Wheelchairs are mostly good solutions for the users who have some type of spinal cord injury or are going through a degenerative process, which temporarily or permanently affects the movement of the lower limbs or, to some degree, the upper limbs. The simple wheelchair is usually a promising solution for a user with movement restriction, although it requires a manual propulsion. However, there is a significant number of patients who have some type of difficulty in motor control of the upper limbs or the restriction of strength to generate the propulsion of a manual wheelchair. For those people, a possible solution is to use motorized wheelchairs, although their high cost and weight greatly limits their acquisition. As an alternative solution, at an affordable cost and flexibility of assembly and disassembly of the propulsion module to a wheelchair, this work presents a solution for converting a manual wheelchair into a motorized wheelchair through the coupling of the motorization kit with feature of easy installation, operation and transportation. This project presents the creation of a propulsion module based not only on the continuation of the work of the research group at the Laboratory of Integrated Systems, but also on extensive research on wheelchair motorization configurations. The propulsion system was developed for the least possible change in the manual wheelchair. The validation of the results obtained in the wheelchair control simulations came from the co-simulation of numeric computing software (MATLAB/Simulink[®]) and analysis of multibody dynamic systems (MSC.ADAMS[®]). This whole process was the result of the application of the feasibility study of the design methodology. Four promising wheelchair motorization solutions were obtained, one of which was detailed in a mathematical model and a physical prototype was built to test the studied characteristics.

Keywords: Motorization kit, Motorized wheelchair, Contact Modeling, Dynamic model of motorized wheelchair, Assistive technology.

Lista de Ilustrações

Figura 2.1 – Representação das cinco regiões da coluna vertebral. (Lacerda, 2023).....	26
Figura 2.2 - Cadeira de Rodas Manual Simples. (“Vollenz Reabilitação”, 2021).	29
Figura 2.3 – Componentes principais de uma cadeira de rodas manual. (Ortobras, 2008).....	29
Figura 2.4 – Cadeira de Rodas Manual Dobrável em “X”. (“Conforpes”, 2021).	30
Figura 2.5 – Cadeira de rodas monobloco. (“Vollenz Reabilitação”, 2021).	31
Figura 2.6 – Cadeira de rodas motorizada. (“Ortoponto”, 2021).	32
Figura 2.7 – Componentes da cadeira de rodas motorizada. Adaptado (Ortobras, 2008b).....	33
Figura 2.8 – Cadeira de rodas motorizada “ <i>stand up</i> ”. (“Cavenaghi”, 2021).	34
Figura 2.9 – Representação da tipologia de cadeira de rodas. (a) Reboque Traseiro, (b) Reboque Dianteiro, (c) Reboque Central, (d) Motorização do Rodízio, (e) Motorização do Cubo da Roda Traseira, (f) Motorização por Engrenamento ou por Atrito. Adaptado (Ogilvie, C., M. Khalili, Hfm Van Der Loos, 2018).....	35
Figura 2.10 – Unidade de Controle do módulo “SMOOV”. Adaptado (Alber GmbH, 2019)..	36
Figura 2.11 – Módulo de “Smoov” (a) Conjunto anexado, (b) Aplicação do módulo, (c) Anexando/Removendo a unidade de tração, (d) Dispositivo de engate. Adaptado (Sports, 2020).	37
Figura 2.12 – Módulo de Reboque traseiro “ <i>Smart Drive MX2</i> ”. Adaptado (“AC Mobility”, 2020) e (“Push Mobility”, 2020).	38
Figura 2.13 – Unidade de tração e controle do módulo “ <i>Smart Drive MX2</i> ”. Adaptado (MOBILIT, 2018) e (“AC Mobility”, 2020).	39
Figura 2.14 – Esquematização do RT. Adaptado (Yincong e Tianjiao, 2020).....	40
Figura 2.15 – Elementos do conjunto de RT. Adaptado (Richter e Mark, 2021).....	41
Figura 2.16 – Esquematização de montagem de RT, semelhante ao módulo “ <i>Smart Drive MX2</i> ”. Adaptado (Richter e Mark, 2021).....	41
Figura 2.17 – Representação do conjunto motorizado em perspectiva da patente “Módulo de locomoção para motorização de veículos e cadeira de rodas manual convencional convertida em cadeira de rodas motorizada”. Adaptado (Dedini e Alvarenga, 2006).	42
Figura 2.18 – Unidade de tração traseira, para sobreposição de aclave/declive conforme a patente “ <i>Wheelchair stair assist apparatus</i> ”. Adaptado (Rembos et al., 2011).	43
Figura 2.19 – (a) Módulo do RT em perspectiva, (b) Vista Explodida, ambas da patente “ <i>Wheelchair stair assist apparatus</i> ”. Adaptado (Rembos et al., 2011).	43

Figura 2.20 – Módulo “Firefly 2.5” e esquematização de RD. Adaptado (Mobility, 2019) e (“Adaptive Specialties”, 2021).	44
Figura 2.21 – Representação da unidade de controle do módulo “Firefly 2.5”. Adaptado (“Adaptive Specialties”, 2021).	45
Figura 2.22 – Representação em perspectiva do conjunto de RD do módulo “Firefly 2.5”. (“Adaptive Specialties”, 2021).	45
Figura 2.23 – Representação dos dispositivos de engate do módulo “Firefly 2.5”. (a) Removido, (b) Anexado. (“Adaptive Specialties”, 2021).	46
Figura 2.24 – Módulo “UNAwheel Mini”. (a) Representação em perspectiva, (b) Vista lateral, (c) Vista Frontal. (“SYNC Living”, 2021).	46
Figura 2.25 – Representação da unidade de tração do módulo “UNAwheel Mini”. Adaptado (“SYNC Living”, 2021).	47
Figura 2.26 – Representação das etapas de Anexação/remoção do módulo “UNAwheel Mini” à cadeira de rodas manual. Adaptado (“2020 Mobility”, 2021).	47
Figura 2.27 – Representação do módulo “UNAwheel Mini basic”. (Care, 2019).	48
Figura 2.28 – Representação do conjunto motorizado por RD, da patente “Manual wheelchair power assist”. Adaptado (Butts e Gowen, 2013).	49
Figura 2.29 – Representação do módulo de RD da patente “Manual wheelchair power assist”. (a) Vista Superior, (b) Vista lateral. Adaptado (Butts e Gowen, 2013).	49
Figura 2.30 – Representação do Conjunto motorizado de RD da patente “Motorized scooter wheelchair attachment device”. Adaptado (Mills e Mills, 2010).	50
Figura 2.31 – Representação do dispositivo de acoplamento do módulo de RD da patente “Motorized scooter wheelchair attachment device”. (a) Vista explodida do dispositivo, (b) Trava de segurança, (c) Trava de fixação. Adaptado (Mills e Mills, 2010).	51
Figura 2.32 – Representação do módulo “Powerpack”. (a) Conjunto anexado a cadeira de rodas manual, (b) “Wheelchair powerpack SOLO”, (c) “Wheelchair powerpack DUO”, “DUO HD” e “PLUS”. (“SYNC Living”, 2020).	52
Figura 2.33 – (a) Representação dos componentes do módulo “Powerpack”, Unidade de controle. (“Merits Australia”, 2021).	53
Figura 2.34 – (a) Representação do conjunto motorizado pelo RC “ZX-1”, (b) módulo “ZX-1”. (“Spinergy”, 2021).	53
Figura 2.35 – Representação do módulo de RC, da patente “Power add-on device for manual wheelchair”. Adaptado (Tallino, 2013).	54

Figura 2.36 – a) Representação do dispositivo de engate aberto, (b) Representação do dispositivo de engate fechado. Adaptado (Tallino, 2013).	55
Figura 2.37 – Representação da estrutura física do módulo de potência da patente “Kit de motorização para cadeira de rodas e veículo auto guiado”. Adaptado (Dedini, Silva e Hanzawa, 2013).	55
Figura 2.38 – (a) Representação do kit de motorização preparado para seguir marcação no piso (Silva, 2011), (b) Vista em Perspectiva posterior da montagem do Kit de motorização central. (Delgado Neto et al., 2008).	56
Figura 2.39 – Representação do conjunto motorizado da patente é “ <i>Assistive driving system for a wheelchair</i> ”. Adaptado (Richter, 2016).	57
Figura 2.40 – Representação da pulseira de controle da unidade de tração do tipo RC da patente “ <i>Assistive driving system for a wheelchair</i> ”. Adaptado (Richter, 2016).	57
Figura 2.41 – Representação do conjunto motorizado da patente “ <i>Assistive driving system for a wheelchair</i> ” com a configuração em RC. Adaptado (Yincong e Tianjiao, 2020).	58
Figura 2.42 –Visa superior do conjunto motorizado da patente “ <i>Assistive driving system for a wheelchair</i> ” com a configuração em RC. Adaptado (Yincong e Tianjiao, 2020).	58
Figura 2.43 – (a) representação genérica das coordenadas do rodízio de uma cadeira de rodas manual. (b) Modelagem computacional do mecanismo de MR. Adaptado (Munakata, Tanaka e Wada, 2015).	59
Figura 2.44 – Representação do módulo “ <i>E-Motion25</i> ”. (“Alber GmbH”, 2021).	60
Figura 2.45 – Representação dos componentes do módulo “ <i>E-Motion25</i> ”. (“Alber GmbH”, 2021) e (GmbH, 2018).	60
Figura 2.46 – Representação do conjunto motorizado pelo módulo de MCT “ <i>Alber e-fix35</i> ”. Adaptado (“Iacess”, 2021).	62
Figura 2.47 – Representação da tampa externa do cubo da roda, (a) Acoplado, (b) Modo livre. Adaptado (GmbH, 2013).	63
Figura 2.48 – Representação em perspectiva do protótipo da cadeira de rodas motorizada no cubo da roda traseira. (Simpson et al., 2005).	63
Figura 2.49 – Representação do conjunto motorizado pelo módulo “ <i>Max-e</i> ” do tipo MEA, com transmissão por engrenamento. (“AAT Asia”, 2021).	64
Figura 2.50 – Componentes do módulo “ <i>Max-e</i> ”. Adaptado (“Casadapta”, 2014).	65
Figura 2.51 – Representação do dispositivo de engate do módulo “ <i>Max-e</i> ”. Adaptado (“Casadapta”, 2014).	66

Figura 2.52 – Representação do módulo de transmissão por engrenamento (a) “Max-e”, (b) “Max-e” infantil, (c) “Max-4”, (d) “V-Max+”. (“AAT Asia”, 2021) e (“Think Mobility”, 2021).	67
Figura 2.53 – (a) Representação do módulo “Light Drive”, (b) Representação do módulo “Light Assist”. Adaptado (“Active Scooters”, 2021).	68
Figura 2.54 – Representação do módulo “Todo Drive”. (a) Unidade de tração, (b) Unidade de controle, (c) Vista lateral do conjunto motorizado. Adaptado (“AC Mobility”, 2020).....	69
Figura 2.55 – Representação dos componentes do módulo “Todo Drive”. (“AC Mobility”, 2020).....	69
Figura 2.56 – Representação do módulo de motorização posicionada nas costas da cadeira de rodas (a) Vista lateral, (b) Vista Superior. Adaptado (Mizuno Masamitsu, 2019).....	70
Figura 2.57 – Veículo na posição de aclave. (Adaptado, Rosa e Nicolazzi, 2012).	72
Figura 2.58 – Deformação do pneu sob força lateral constante, (a) Vista Frontal, (b) Vista Inferior. (Adaptado, Jazar, 2008).	74
Figura 2.59 – Força Lateral (F_y) em função do ângulo de escorregamento (α) para a carga vertical constante. (Jazar, 2008).	75
Figura 2.60 – Cadeira de rodas manual, motorizada e esportiva. (NBR 9050, 2015).....	76
Figura 2.61 – Faixa de acomodação para travessia. (NBR 9050, 2015).	76
Figura 2.62 – Ângulo de cambagem negativa (γ) em cadeira de rodas. (José, 2008).	78
Figura 2.63 – Ângulo de Cambagem, (a) positivo, (b) negativo, (c) zero. (Esfahani et al., 2010).	79
Figura 3.1 – Fluxograma do estudo de viabilidade geral. (Dedini, 2022).	81
Figura 3.2 – Matriz QFD. (Delgado Neto, 2009).	82
Figura 4.1 – Diagrama Funcional da Cadeira de rodas motorizada	86
Figura 4.2 – Quadro Morfológico da cadeira de rodas motorizada (a) Geral (b) Calibração do QM.....	87
Figura 4.3 – Quadro Morfológico da cadeira de rodas motorizada.....	88
Figura 4.4 – Fragmento do quadro morfológico da cadeira de rodas motorizada em visualização 3D interativa em plataforma on-line.....	89
Figura 4.5 – Filtragem do Quadro Morfológico da cadeira de rodas motorizada	91
Figura 4.6 – Seleção das soluções fisicamente viáveis da filtragem do Quadro Morfológico da cadeira de rodas motorizada	91
Figura 4.7 – 1ª Proposta de Solução do kit de motorização para uma cadeira de rodas manual em perspectiva posterior.....	93

Figura 4.8 – 1ª Proposta de Solução do kit de motorização para uma cadeira de rodas manual em perspectiva anterior.....	94
Figura 4.9 – Representação dos pontos de ancoragem do módulo ao chassi da cadeira de rodas da 1ª Proposta de Solução do kit de motorização para uma cadeira de rodas manual.	94
Figura 4.10 – Representação do dispositivo de acionamento do módulo de propulsão e dos freios de repouso da 1ª proposta de solução do kit de motorização. (a) Capa de proteção opaca (b) Capa de proteção transparente.	95
Figura 4.11 – 2ª Proposta de Solução do kit de motorização para uma cadeira de rodas manual.	96
Figura 4.12 – Vista em perspectiva do dispositivo de acionamento da 2ª Proposta de Solução do kit de motorização para uma cadeira de rodas manual.	96
Figura 4.13 – 3ª Proposta de Solução do kit de motorização para uma cadeira de rodas manual.	97
Figura 4.14 – Ampliação da região do kit de motorização da 3ª Proposta de Solução.	98
Figura 4.15 – 4ª Proposta de Solução do kit de motorização para uma cadeira de rodas manual.	99
Figura 4.16 – Ampliação da região do kit de motorização da 4ª Proposta de Solução.	99
Figura 5.1 – Cadeira de rodas manual dobrável em X, modelo Jaguaribe FIT. (Jaguaribe, 2022)	101
Figura 5.2 – Principais especificações da cadeira de rodas manual Jaguaribe Fit. Adaptado (Jaguaribe, 2022).	102
Figura 5.3 – Conjunto de dispositivos permanentes para acoplamento ao chassi da cadeira de rodas.	102
Figura 5.4 – Mecanismos frontal de acionamento, com três posições de operação.	103
Figura 5.5 – Representação evidenciada do lado esquerdo do módulo de propulsão.	104
Figura 5.6 – Kit de motorização salientado, em função da transparência da cadeira de rodas.	104
Figura 5.7 – Kit de motorização da 1ª proposta de solução virtualmente posicionados.	105
Figura 5.8 – Vista em perspectiva da montagem do kit de motorização (a) Vista em perspectiva anterior, (b) Vista em perspectiva posterior.	105
Figura 5.9 – Vistas da motorização da cadeira de rodas (a) Vista Frontal, (b) Vista Posterior, (c) Vista Lateral Esquerda, (d) Vista Superior.	106
Figura 5.10 – Modelo representado no MSC.ADAMS®.....	108
Figura 5.11 – Diagrama de blocos do modelo no MATLAB/Simulink®.....	108

Figura 5.12 – Configurações de inclinação de pista das simulações. (a) Pavimento plano, (b) Combinação de pavimento plano e inclinado a 3,5%, (c) Combinação de pavimento plano e inclinado a 5%.	109
Figura 5.13 – Configurações de velocidade objetivo das simulações.	110
Figura 6.1 – Curva de velocidade da CRs, em pavimento plano.....	111
Figura 6.2 – Curva de deslocamento longitudinal da CRs, em pavimento plano.....	112
Figura 6.3 – (a) Curva de torque por motor, (b) Curva de potência por motor.	113
Figura 6.4 – Curva de velocidade da CRs, em pavimento plano (velocidade objetivo em degrau).	114
Figura 6.5 – Curva de velocidade da CRs, em pavimento com aclive de 2°.	115
Figura 6.6 – Curva de deslocamento longitudinal da CRs, em pavimento com aclive de 2°.	115
Figura 6.7 – (a) Curva de torque por motor, (b) Curva de potência por motor. Ambos com pavimento com aclive de 2°.	116
Figura 6.8 – Curva de velocidade da CRs, em pavimento com aclive de 2,9°.	117
Figura 6.9 – (a) Curva de torque por motor, (b) Curva de potência por motor. Ambos com aclive de 2,9°.	117
Figura 7.1 – Estrutura de suporte do kit de motorização construído em Madeira.....	118
Figura 7.2 – Caixa de eletrônicos produzida em impressora 3D pelo método de FDM.	120
Figura 7.3 – Dispositivo de controle da cadeira de rodas por <i>Joystick</i>	120
Figura 7.4 – Dispositivo de fixação da estrutura de suporte do kit de motorização.....	121
Figura 7.5 – Representação em vista lateral do protótipo físico.	121
Figura 7.6 – Representação em vista frontal do protótipo físico.....	122
Figura 7.7 – Representação em perspectiva posterior do protótipo físico.....	123
Figura 7.8 – Representação ampliada dos dispositivos do módulo de propulsão em perspectiva posterior do protótipo físico.	123
Figura A0.1 – Característica do Pneu em estado estacionário. (Bakker, Pacejka e Lidner, 1989)	134
Figura A0.2 – Novos coeficientes que surgem na fórmula do pneu. (Bakker, Pacejka e Lidner, 1989).....	135
Figura C0.1 – Esquema de ligação elétrico e eletrônico do kit de motorização do protótipo físico da cadeira de rodas.	144

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Representação da tabela de dispositivos em função do tipo de LM. Adaptado (Bates, 2002).....	27
Tabela 3.1 – Tabela valores comparativos aproximados para alguns modelos comerciais de diferentes tipologias.....	84
Tabela 7.1 – Descrição dos componentes elétricos e eletrônicos relativos à construção do protótipo.	119
Tabela A1 – Coeficientes para fórmula do pneu com influência de carga. (Bakker, Nyborg e Pacejka, 1987).	136
Tabela A2 – Coeficiente para fórmula do pneu conectado e com influência do ângulo de cambagem. (Bakker, Nyborg e Pacejka, 1987)	136
Tabela A3 – Coeficientes de α_0 a α_7 para diferentes tipos de pisos, utilizando pneu 1 de propulsão. (Silva, 2011).	142
Tabela A4 – Coeficientes para dois tipos de pneus testados. (Silva, 2011).	142
Tabela B1 – Tabela com as massas equivalentes da cadeira de rodas, módulo e <i>Dummy</i>	143

Lista de Abreviaturas e Siglas

Letras Latinas

A	Área frontal do veículo
a	Subcoeficientes do PAC87 e da F_y do PAC89
b	Subcoeficientes do F_x do PAC89
B	Fator de rigidez
c	Subcoeficientes do M_z do PAC89
C	Fator de forma
C_α	Rigidez ao deslizamento da roda
C_x	Coeficiente de arrasto
D	Fator de pico
E	Fator de curvatura
F_x	Força Longitudinal
F_y	Força Lateral
F_z	Força Vertical
G	Peso equivalente do carro
g	gravidade
M_z	Momento de Alinhamento
P_c	Potência no Cubo
P_e	Potência efetiva no motor
Q_A	Resistência Aerodinâmica
Q_s	Resistência ao Aclive
η_m	Rendimento mecânico da transmissão.
S_h	Deslocamento horizontal
S_v	Deslocamento vertical
X	Entrada genérica da FM
Y	Saída genérica da FM

Letras Gregas

α	Ângulo de inclinação de rampa, ângulo de Deriva
γ	Ângulo de cambagem

η	Rendimento mecânico da transmissão
κ	Escorregamento longitudinal
μ	Coeficiente de atrito
Ω	Velocidade angular do pneu
v	Velocidade relativa do veículo
ρ	Densidade do ar

Subscritos

o	Em escorregamento puro
x	Em Força Longitudinal
y	Em Força Lateral
z	Em Momento de Alinhamento
e	Em atrito estático
d	Em atrito dinâmico

Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CRs	Cadeira de Rodas
C1 a C8	Vertebra Cervical (Numeradas de 1 a 8)
DFXs	<i>Design For Excellence</i>
EMG	Eletromiografia
FDM	<i>Fused Deposition Modeling</i>
FEM	Faculdade de Engenharia Mecânica
FM	Fórmula Mágica
GAT	Grau Auxiliar de Tração
GIT	Grau Integral de Tração
INPI	Instituto Nacional da Propriedade Industrial
LabSIn	Laboratório de Sistemas Integrados
LM	Lesão Medular
MEA	Motorização por Engrenamento ou por Atrito
MCT	Motorização do Cubo da Roda Traseira
MR	Motorização do Rodízio

NBR	Norma Técnica Brasileira
ODE	<i>Ordinary Differential Equations</i>
ONU	Organizações das Nações Unidas
PAC2002	Modelo de Pacejka 2002
PAC87	Modelo de Pacejka 87
PAC89	Modelo de Pacejka 89
PCD	Pessoa Com Deficiência
PVSL	Plano Viver Sem Limites
PLA	Ácido Poliláctico
QM	Quadro Morfológico
RC	Reboque Central
RD	Reboque Dianteiro
RT	Reboque Traseiro
T1	Vertebra torácica número 1
Unicamp	Universidade Estadual de Campinas

Sumário

1	INTRODUÇÃO.....	21
1.1	Objetivos gerais	24
1.2	Objetivos específicos	24
2	REVISÃO DA LITERATURA	25
2.1	Cadeiras de Rodas Manuais	28
2.1.1	Cadeira de rodas Manual Simples	28
2.1.2	Cadeira de rodas dobrável em “X”	30
2.1.3	Cadeira de rodas monobloco	30
2.2	Cadeira de Rodas Motorizadas	31
2.2.1	Cadeira de rodas motorizada	31
2.2.2	Cadeira de rodas com elevação automática	33
2.3	Tipologia dos módulos de motorização	34
2.3.1	Reboque Traseiro.....	36
2.3.2	Reboque Dianteiro	44
2.3.3	Reboque Central	51
2.3.4	Motorização do Rodízio	59
2.3.5	Motorização do Cubo da Roda Traseira	59
2.3.6	Motorização por Engrenamento ou por Atrito	64
2.3.6.1	Motorização por engrenamento	64
2.3.6.2	Motorização por Atrito	67
2.3.7	Dinâmica longitudinal	71
2.4.1.1	Resistência Mecânica	71
2.4.1.2	Resistência ao aclave.....	72
2.4.1.3	Resistência Aerodinâmica	73
2.4.1.4	Resistência ao rolamento	73

2.3.8	Dinâmica Lateral	74
2.4	Ergonomia e Antropometria	75
2.5	Pneus.....	77
2.5.1	Teoria de Coulomb	77
2.5.2	Modelos Semiempíricos	77
2.5.3	Equações de Pacejka.....	77
2.5.4	Ângulo de Cambagem	78
3	METODOLOGIA DE PROJETO	80
4	MODELO PROPOSTO DE MOTORIZAÇÃO DE CADEIRA DE RODAS.....	85
5	PROTÓTIPO VIRTUAL E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	101
5.1	Descrição do protótipo	101
5.2	Procedimento de simulação do protótipo.....	106
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	111
7	PROTÓTIPO FÍSICO	118
8	CONCLUSÕES	125
9	TRABALHOS FUTUROS	126
	Referências	127
	Apêndice A – Modelo complementar da teoria de Pneu por Pacejka	134
	Equacionamento de Pacejka para modelo de 1987. (PAC87).....	134
	Equacionamento de Pacejka para o modelo de 1989. (PAC89).....	138
	Estimativas para Coeficientes de pneus.....	141
	Apêndice B – Tabela com massa dos elementos do modelo virtual	143
	Apêndice C – Esquema de ligação do Circuito Elétrico e Eletrônico do kit de motorização do protótipo físico da cadeira de rodas.....	144
	Apêndice D – Código para controle do kit de motorização do protótipo físico da cadeira de rodas.	145

1 INTRODUÇÃO

Esse trabalho vem abordar um tema cada vez mais comum em nosso cotidiano, a inclusão social de deficientes físicos, principalmente as pessoas que apresentam lesões medulares que comprometeram o movimento parcial ou completo dos membros inferiores, paralisia ou tetraplegia. As mudanças arquitetônicas, principalmente nos centros urbanos, vêm facilitando gradativamente os deslocamentos com cadeiras de rodas (CRs).

A Lei nº 10.098, de 19 de dezembro de 2000, no artigo 1º, estabelece normas gerais e critérios básicos para a promoção da acessibilidade das pessoas portadoras de deficiência ou com mobilidade reduzida, mediante a supressão de barreiras e de obstáculos nas vias e espaços públicos, no mobiliário urbano, na construção e reforma de edifícios e nos meios de transporte e de comunicação.

As reformas e as novas construções baseadas nessa metodologia de adequação permitem o melhor deslocamento das pessoas com mobilidade reduzida, ampliando a inclusão sociocultural mediante acessibilidade e independência de movimento das pessoas que precisam das cadeiras de rodas para seu deslocamento.

Posteriormente a lei foi reforçada pelo decreto nº 5.296 de 2 de dezembro de 2004 e baseada nesse decreto a norma ABNT NBR 9050 (Normas como de acessibilidade a Edificações, mobiliários espaços e equipamentos urbanos) foi criada para normatizar a acessibilidade na área de empreendimentos civis.

Outro importante passo da legislação brasileira, foi o Plano Nacional dos Direitos da Pessoa com Deficiência ou Plano Viver sem Limite (PVSL), instituído pelo Decreto 7.612, em 17 de novembro de 2011. Nesse decreto, o Governo Federal ressaltou o compromisso do Brasil com as prerrogativas da Convenção sobre os Direitos das Pessoas com Deficiência, da ONU, ratificada pelo nosso país com equivalência de emenda constitucional (Deficiência, SDH e SNPD, 2013). Segundo o Governo Federal, o sucesso do PVSL foi reconhecido, em 2016, como um dos destaques no Centro Internacional das Nações Unidas em Viena, na Áustria, onde recebeu um dos mais importantes prêmios internacionais de boas práticas na promoção dos direitos da pessoa com deficiência – o Certificado Zero Project (Brasil, 2016). Concedido anualmente, para setores que incentivam esse modelo de trabalho. Com esse plano citado anteriormente, as pessoas com deficiência podem solicitar uma cadeira de rodas motorizada a partir do SUS, cumprindo algumas etapas burocráticas exigidas pelo governo, além de um laudo fornecido por um médico, habilitando o paciente para ser contemplado pelo programa.

Já em entre os anos de 2015 e 2016, foi implementada a lei nº 13.146, de julho de 2015, conhecida como a Lei Brasileira de Inclusão da Pessoa com Deficiência (Estatuto da Pessoa com Deficiência), que hoje apresenta a legislação de maior abrangência com relação a inclusão sociocultural.

Dentre normativas para inclusão de pessoas com deficiência (PCD), os meios físicos desenvolvidos para a inclusão dessas pessoas são cada vez mais incorporados como, por exemplo, as cadeiras de rodas.

Para atendimento das pessoas que precisam desse recurso, existem algumas soluções, entretanto precisam ser levados em consideração diversos fatores restritivos de cada pessoa, como o tipo de lesão medular que, a depender da característica e nível, altera de maneira diferente a capacidade motora dos membros superiores e também do tempo em que cada usuário precisará usar uma cadeira de rodas.

Existem as cadeiras de rodas manuais, cuja propulsão é realizada pelo próprio usuário ou por um terceiro, seja empurrando ou puxando a cadeira de rodas.

Uma alternativa é o uso de cadeira de rodas elétricas, que recebem esse nome quando o sistema de motorização é integrado a cadeira de rodas.

Outra opção que será mais explorada nesse trabalho, são os módulos de propulsão complementar ou substituta da propulsão humana, que é o recurso da motorização das cadeiras de rodas manuais. Tais módulos podem apresentar diferentes configurações de anexação à CRs.

Uma característica relevante, para aplicação da metodologia de projeto de maneira mais eficaz está no aprofundamento das questões pessoais dos principais envolvidos nas questões que serão abordadas. De acordo com Rodrigues (2022) existem diversas técnicas de desenvolvimentos de produto onde o usuário ou principal beneficiado pode fornecer elementos importantes para o desenvolvimento e avaliação de produtos.

Rodrigues (2022), apresenta algumas técnicas de observação do comportamento do público-alvo, que podem ser do tipo acompanhada ou não. Esse tipo de abordagem pode fornecer uma visão geral da demanda por produtos, permitindo o entendimento de necessidades específicas do indivíduo, potenciais necessidades como falas, sentimentos, atitudes não mencionadas em questionários, dores e desconforto.

Misch (2020), apresenta uma abordagem de desenvolvimento de uma modelagem matemática com objetivo de avaliar os esforços que o usuário de cadeira de rodas precisa exercer sobre o aro de propulsão durante deslocamentos de trajetórias retilíneas e curvilíneas. O mapeamento desses esforços tem como grande benefício a obtenção de parâmetros que possam proporcionar o desenvolvimento de soluções que permitam minimizar os esforços dos

membros superiores além de reduzir o risco de lesões ou agravamento de quadro clínico do usuário de cadeira de rodas.

Segundo Abreu (2010), algumas características nocivas devido aos preconceitos ainda estão presentes na sociedade, quando se trata de Pessoa com Deficiência. Embora apresente um histórico sobre a evolução do comportamento da sociedade sobre o comportamento ao longo dos anos, percebe-se a necessidade contínua de avanço nesse sentido.

Uma sociedade que investe em educação, demonstra uma maturidade melhor de entendimento da sua condição humana e suas relações, proporciona uma sociedade mais consciente sobre seus indivíduos e sobre sua própria existência, resultando em bem estar coletivo para as pessoas com deficiência ou não.

1.1 Objetivos gerais

O trabalho tem como objetivo apresentar a aplicação de metodologia de projeto que atenda com flexibilidade a opção de motorizar uma cadeira de rodas manual para adultos, a partir de um conjunto modular prático e compacto de fácil conexão com a estrutura da cadeira de rodas convencional.

1.2 Objetivos específicos

- Realizar pesquisa de similares sobre as cadeiras de rodas elétricas com dispositivos de acionamento permanente (considerar peso, flexibilidade, preço e autonomia) ou cadeiras de rodas manuais que apresentam sistemas de tração modulares, com a possibilidade de intercambiar o módulo entre as cadeiras de rodas padrões de maneira prática e elencar quanto as suas tipologias.

- Elaborar um módulo de tração com foco em fácil manipulação e construção por meio das *Design for excellence* (DFX), *Design for Assembly* (DFA), *Design for Disassembly* (DFD), *Design for Human Factors/Ergonomics* (DFHF/DFE) e *Design for Accessibility* (DFAc), que possa atender da melhor maneira a utilização pelo usuário final.

- Inferir as grandezas físicas envolvidas na aplicação da solução escolhida, perante manobras em trecho plano e trecho em aclive e analisar o desempenho da solução proposta do módulo de propulsão da cadeira de rodas por meio de simulações computacionais.

2 REVISÃO DA LITERATURA

A liberdade de deslocamento entre os lugares permite ao homem diversas possibilidades, aumentando assim a chance de interação interpessoal, como trabalhar, ter lazer e diversas outras situações. Muitas pessoas que por algum motivo perderam ou nunca tiveram parte ou total movimento dos membros inferiores, denominado paraplegia, em consequência de alguma lesão da medula, necessitam de algum tipo de instrumento para se locomover e a cadeira de rodas é normalmente uma solução. Diante de tal situação, a ideia de motorizar uma cadeira de rodas convencional, visa anteder os diversos entraves que o cadeirante possa encontrar.

De maneira geral as sociedades apresentam uma tendência de envelhecimento. Segundo United Nations (2017) a população mundial com mais de 80 anos era de 9% em 1980, 14% em 2007 e estima-se que ultrapasse os 20% entre 2030 e 2050. Além disso, a partir dessa idade também normalmente apresentam um desgaste físico natural. Assim, passaram a ser prioridade investimentos em dispositivos que auxiliam as pessoas a se locomoverem com mais independência.

De acordo Tomari, Kobayashi e Kuno (2012), as cadeiras de rodas inteligentes vêm sendo aplicadas em três áreas principais: 1) Melhorias na mecânica da tecnologia assistiva, 2) Melhorias na interface física usuário-máquina, 3) Melhorias no controle compartilhado entre o usuário e a máquina.

Essas áreas de atuação visam a atender ao público que apresenta também dificuldade motora para os controles convencionais das cadeiras de rodas, dessa forma os controles são investigados para melhorar a alimentação dos atuadores perante os comandos fornecidos pelo usuário.

A coluna cervical é subdividida em cinco regiões, denominadas de: Coluna cervical, coluna torácica, coluna lombar, sacro e o cóccix. Para cada lesão em uma região específica, podem ocorrer diferentes níveis de restrição do movimento, a Figura 2.1 representa as regiões da coluna vertebral.

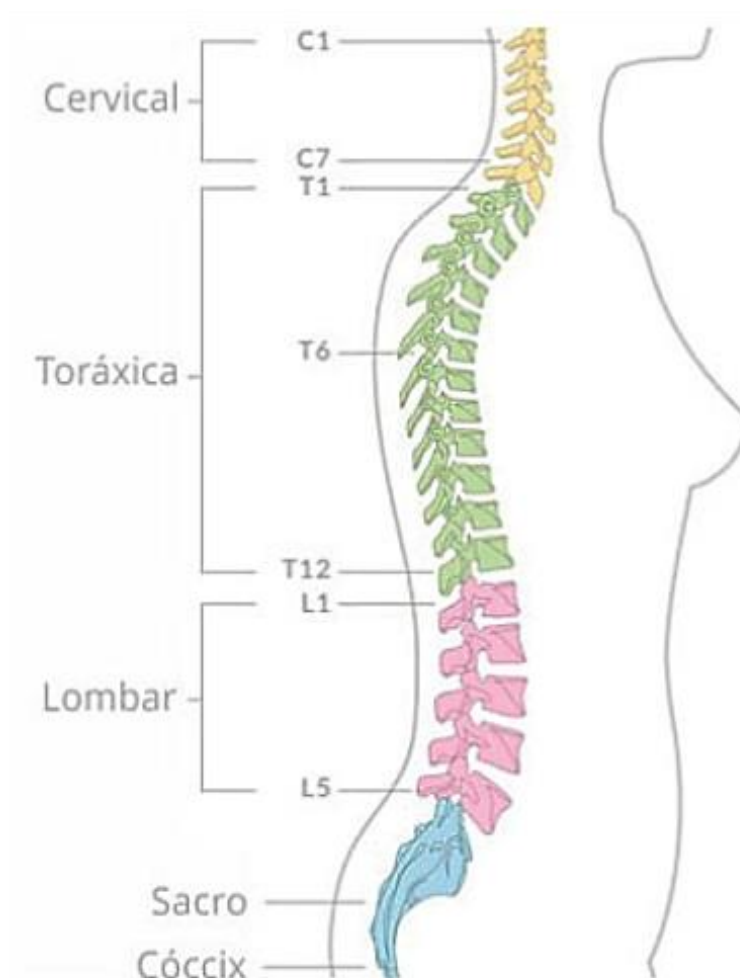


Figura 2.1 – Representação das cinco regiões da coluna vertebral. (Lacerda, 2023).

Conforme sugerido por Bates (2002), uma tabela das características e requisitos de manipulação de uma variedade de dispositivos de entrada permite que um mapa detalhado seja construído mostrando quais características sensoriais e motoras são necessárias para operar diferentes dispositivos de entrada de computador em função do tipo de Lesão Medular (LM), conforme Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Representação da tabela de dispositivos em função do tipo de LM. Adaptado (Bates, 2002).

Níveis completos de ramos de lesão medular e dispositivos de entrada dos candidatos														
C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	T1						
Rastreador Ocular														
Interruptor de piscar os olhos														
Onda Cerebral														
Movimento facial														
Interruptor de mordida														
Joystick de língua														
Interruptor de língua														
Chaves de cabeça - direções de movimento limitadas														
Posição de cabeça com 6 GDL - direções de movimento limitadas														
Interruptor de Queixo														
Comando de voz														
Músculo EMG (músculos disponíveis)														
		interruptor sip-puff (diafragmático)												
		Joystick de queixo												
		Mouse de cabeça												
		Bastão bucal												
		Interruptores de ombro												
		Posição do ombro com 6 GDL												
				Interruptor de flexão do cotovelo (retorno assistido)										
				Articulação do ombro - interruptores do braço										
				Articulação do ombro – Posição do braço com 6 GDL										
						Interruptor de extensão do pulso (retorno assistido)								
						Mouse								
						Bola de comando (trackball)								
						Joystick								
						Glidepoint								
						Tela sensível ao toque								
						Teclado alternativo								
								Interruptor de pulso						
								Posição de pulso						
								Posição da mão com 6 GDL						
								Interruptor de polegar						
								Posição de polegar						
								Teclado padrão						
								Interruptor de dedo						
						Posição de dedo								
						Tablet / Caneta								
						Bola espacial								
						Luva espacial								

A partir da apresentação dos dispositivos de controle em função da lesão medular na Tabela 2.1, o controle realizado pelo músculo através da Eletromiografia (EMG) apresenta destaque na tabela por demonstrar ampla área de atuação entre os níveis completos de LM. Segundo Oliveira et al. (2012), o estudo EMG é a verificação do sinal elétrico do músculo, bem como o estudo da atividade muscular.

A patente de Dedini et al. (2012), cujo título é “Dispositivo assistivo de interface homem-máquina e equipamento controlados pelo mesmo”, apresenta solução de controle ao usuário com algum tipo de lesão motora, cuja interface homem-máquina com as mãos seja incompatível, por exemplo controle por joystick ou teclado. Apresenta também uma nova alternativa de controle por navegação virtual de equipamentos sem o auxílio das mãos.

Dessa forma, a patente apresenta o controle através da leitura de sinais gerados pela contração do músculo da sobancelha ou de outro músculo disponível. Sensores detectam esses movimentos e enviam sinais aos atuadores da unidade de tração previamente adaptada ao veículo.

2.1 Cadeiras de Rodas Manuais

2.1.1 Cadeira de rodas Manual Simples

Este tipo de cadeira é mais básico, com poucas funcionalidades, e envolve pequenas possibilidades de ajustes, consequentemente apresenta preço mais acessível, utilizado principalmente pela população de menor poder aquisitivo, ou para pacientes que apresentam dificuldade de locomoção temporária.

De acordo com Michael Boninger (2011), se o usuário apresenta condições de operar a cadeira de rodas manual essa é a melhor maneira de mobilidade, pois as cadeiras são de fácil transporte, necessitam de menos reparo, além de oferecer uma forma de exercício físico. No entanto, essa forma não é para todos os usuários. Normalmente usuários com lesão medular abaixo da vertebra cervical C6, apresentam capacidade de impulsionar uma cadeira manual, e com lesão na C6 podem ou não apresentar essa capacidade. O que dependerá de outras características como peso, e características individuais de mobilidade.

Em contrapartida o esforço para movimentar a cadeira de rodas manual (Figura 2.2) pode causar algumas lesões por esforço repetitivo ou de lesões devido ao esforço para executar algumas manobras mais complexas, que exige maior empenho do usuário.



Figura 2.2 - Cadeira de Rodas Manual Simples. (“Vollenz Reabilitação”, 2021).

Componentes principais da cadeira de rodas manual, representados na Figura 2.3:

- | | |
|-----------------------------------|---|
| 1 – Prolongador do encosto, punho | 6 – Aro de impulso |
| 2 – Encosto | 7 – Conjunto de freio |
| 3 – Assento | 8 – Conjunto apoio pé |
| 4 – Apoio de braços removível | 9 – Conjunto roda dianteira |
| 5 – Conjunto roda traseira | 10 – Botão de extração da roda traseira |



Figura 2.3 – Componentes principais de uma cadeira de rodas manual. (Ortobras, 2008).

2.1.2 Cadeira de rodas dobrável em “X”

Esse modelo apresenta maior flexibilidade, tanto de opções para posicionamentos dos acessórios pelo usuário, encosto dos braços, das costas, as alturas dos suportes para pé, bem como na desmontagem da cadeira para transporte. Esse modelo normalmente oferece maior conforto do que o modelo de Cadeira de Rodas simples.

Segundo Mattos (2017), as cadeiras dobráveis em “X” (Figura 2.4) podem ser categorizadas como fecho horizontal, (o encosto dobra-se sobre o assento) e o vertical. O formato dessas cadeiras apresenta também maior estabilidade, característica relevante principalmente para usuários com menor mobilidade dos membros superiores.



Figura 2.4 – Cadeira de Rodas Manual Dobrável em “X”. (“Conforpes”, 2021).

2.1.3 Cadeira de rodas monobloco

As cadeiras de rodas monobloco, ou rígidas, representada na Figura 2.5. Apresentam melhor desempenho durante as manobras, embora apresentam desvantagem no transporte, já que normalmente são de difícil desmontagem, em alguns casos podem chegar a tamanhos pequenos se retirada as rodas, e dobrando o encosto (Boninger, 2011).

Essas cadeiras podem ser bem mais leves que as cadeiras manuais convencionais, se confeccionadas de ligas metálicas resistentes e leves.



Figura 2.5 – Cadeira de rodas monobloco. (“Vollenz Reabilitação”, 2021).

2.2 Cadeira de Rodas Motorizadas

2.2.1 Cadeira de rodas motorizada

As cadeiras de rodas podem ser comercializadas como um projeto inteiramente motorizado, ou podem ser cadeiras de rodas manuais onde seja possível integrar kits que permitam a motorização da cadeira de rodas tradicional, (Dedini, Silva e Hanzawa, 2013). Tanto o equipamento que possa ser adquirido completamente motorizado ou o caso de aquisição de kits para adaptação, normalmente precisam de um projeto modular para melhor adaptação a necessidade do usuário.

Segundo Simpson et al. (2004), as cadeiras de rodas manuais apresentam grandes vantagens para a maioria dos usuários e, para algumas pessoas, a motorização é difícil ou mesmo impossível. Para isso pesquisadores procuram desenvolver cadeiras de rodas motorizadas (Figura 2.6) cada vez mais inteligentes, com sensores e sistemas atuantes para compensar a falta de função motora, de alguns usuários, o que também auxilia na autonomia.



Figura 2.6 – Cadeira de rodas motorizada. (“Ortoponto”, 2021).

Componentes principais da cadeira de rodas motorizada (Figura 2.7), segundo: (Ortobras, 2008b).

- | | |
|--------------------|-------------------------------|
| 1 – Punho | 7 – Roda traseira |
| 2 – Encosto | 8 – Conjunto pedal |
| 3 – Apoio de braço | 9 – Motor |
| 4 – Joystick | 10 – Conjunto roda dianteira. |
| 5 – Almofada | 11 – Armazenadores |
| 6 – Trava do pedal | |

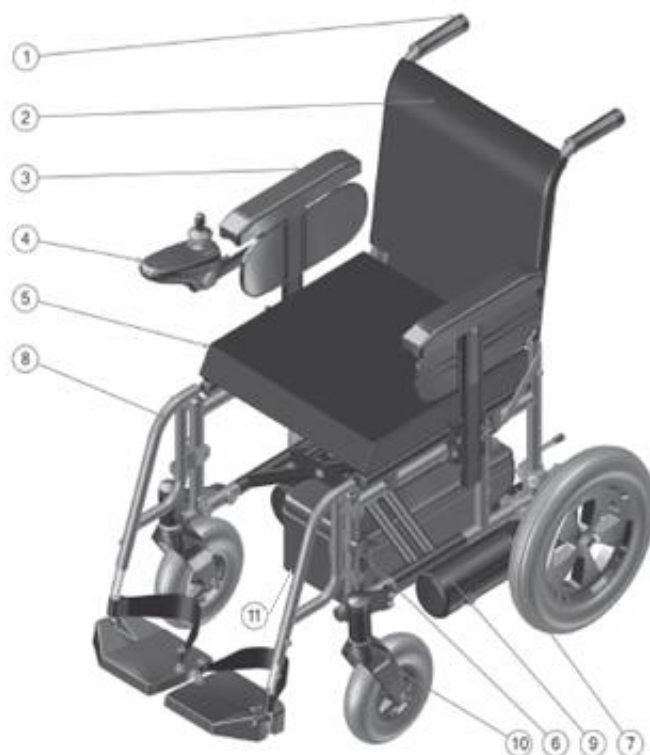


Figura 2.7 – Componentes da cadeira de rodas motorizada. Adaptado (Ortobras, 2008b).

2.2.2 Cadeira de rodas com elevação automática

Segundo Jiang, Yin e Tanaka (2019) normalmente as cadeiras de rodas que permitem ao usuário subir ou descer escadas ou permitem ficar em pé (Figura 2.8) são cadeiras volumosas. Podem ser do tipo de esteiras, roda de engrenagem planetária dupla, dentre outras. Essas cadeiras de elevação automática são uma boa estratégia, principalmente para os idosos que ainda apresentam mobilidade, no entanto reduzida devido ao declínio muscular com o avanço da idade.



Figura 2.8 – Cadeira de rodas motorizada “stand up”. (“Cavenaghi”, 2021).

2.3 Tipologia dos módulos de motorização

Segundo Ogilvie, C., M. Khalili, Hfm Van Der Loos (2018), no mercado são oferecidos alguns exemplos de equipamentos destinados ao público com mobilidade reduzida, cita três possibilidades de propulsão:

Reboque Traseiro (RT), representado pela Figura 2.9(a), caracterizado pela roda motriz no módulo que fica localizada atrás da linha do eixo da roda traseira, de forma a tracionar a cadeira de rodas por trás.

Reboque Dianteiro (RD), representado pela Figura 2.9(b), apresenta como característica predominante uma unidade de tração que fica localizada na frente da linha do eixo do rodízio, e apresenta o modo de esterçamento como uma junta de rotação para realização da manobra do conjunto motorizado.

Motorização do Cubo da Roda Traseira (MCT), este tipo de módulo é representado pela Figura 2.9(e), e apresenta como característica principal os motores e a transmissão dentro do tambor da roda.

Entretanto, é possível identificar mais três formas de propulsão:

Reboque Central (RC), ilustrado na Figura 2.9(c), representado por uma unidade de tração, cuja roda motriz, está em contato com o solo na mesma linha do eixo da roda traseira da cadeira de rodas.

Motorização do Rodízio (MR), representado pela Figura 2.9(d) caracteriza-se por apresentar motorização no cubo do rodízio, e o modo de esterçamento é dado pelo próprio grau de liberdade da junta de rotação da cadeira de rodas manual (Item 9 da Figura 2.3).

Motorização por Engrenamento ou por Atrito (MEA), caracterizado por uma unidade de tração que fica suspensa na cadeira de rodas manual. Este módulo transmite potência à roda traseira através de atrito ou por engrenamento, conforme a representação genérica da Figura 2.9(f).

Os módulos podem ser definidos também pelo grau de tração, que pode ser do tipo:

Grau Integral de Tração (GIT), quando o módulo apresenta força suficiente para impulsionar a cadeira de rodas de maneira completa, independente do auxílio da força humana.

Grau Auxiliar de Tração (GAT), quando o módulo apresenta força motriz para complementar o impulso da força humana, tanto para quando a cadeira for operada pelo próprio usuário ou quando for por uma outra pessoa como assistente.

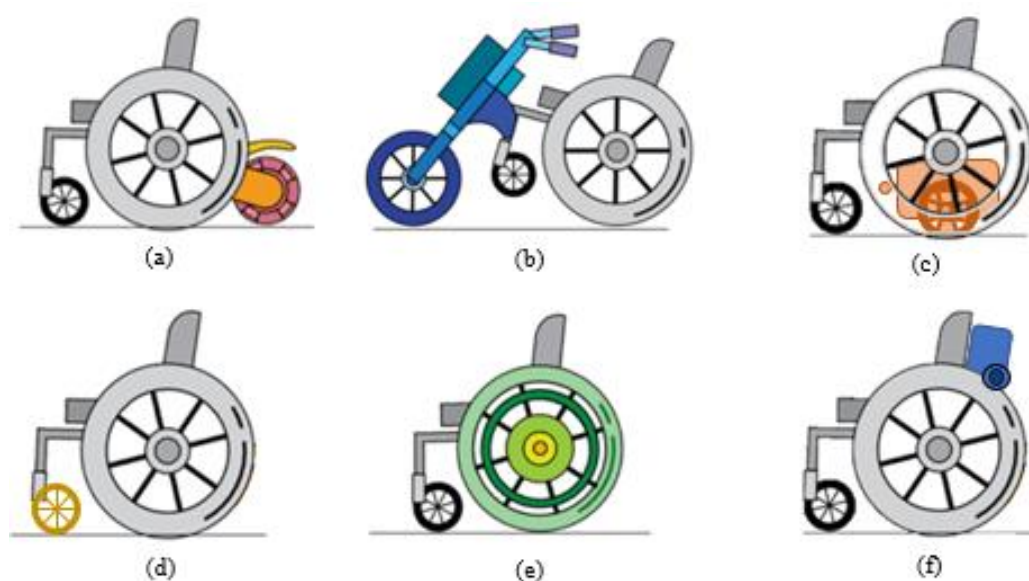


Figura 2.9 – Representação da tipologia de cadeira de rodas. (a) Reboque Traseiro, (b) Reboque Dianteiro, (c) Reboque Central, (d) Motorização do Rodízio, (e) Motorização do Cubo da Roda Traseira, (f) Motorização por Engrenamento ou por Atrito. Adaptado (Ogilvie, C., M. Khalili, Hfm Van Der Loos, 2018).

2.3.1 Reboque Traseiro

Neste trabalho serão apresentadas duas configurações para unidade de tração de RT, onde apresentam diferentes modos de esterçamento e controle.

O primeiro modelo comercial analisado é o dispositivo conhecido como “SMOOV”, representado pela Figura 2.10(a). Este módulo apresenta como componentes principais o módulo de tração, o conjunto de baterias, e uma unidade de controle.

A unidade de controle é fixa ao chassi da cadeira, dessa forma o usuário pode escolher a maneira mais conveniente para operar. O acoplamento é realizado de maneira simples como ilustrado na Figura 2.10 de (a) a (c), e a comunicação entre o dispositivo de controle e a unidade de tração sem fio, através de *Bluetooth*.

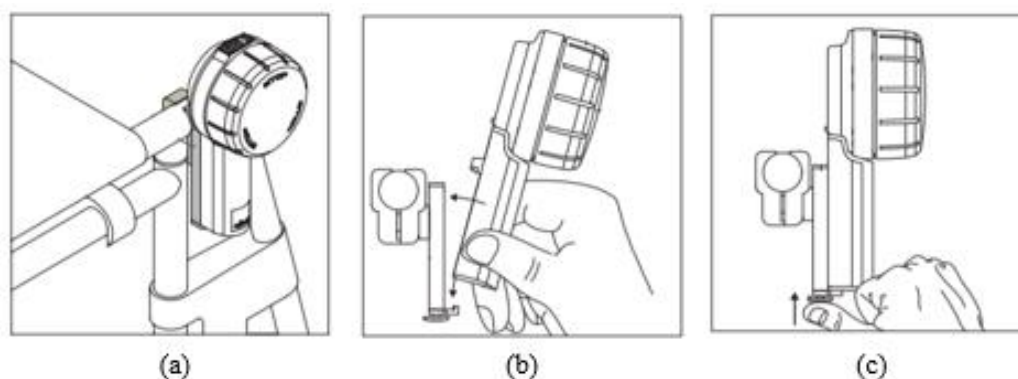


Figura 2.10 – Unidade de Controle do módulo “SMOOV”. Adaptado (Alber GmbH, 2019).

O modo de esterçamento consiste de uma junta de revolução na roda motriz com relação ao eixo vertical “y” indicado na Figura 2.11(a), o que permite a manobrabilidade da cadeira de rodas. No manual do produto fornecido pela empresa “Alber GmbH” (2021), este conjunto apresenta propulsão apenas como grau auxiliar de tração. Esse conjunto também apresenta restrição de velocidade durante o deslocamento em curvas, para evitar o possível tombamento da cadeira de rodas.

O acoplamento deste RT na cadeira se dá através da conexão centralizada no eixo da roda traseira (Figura 2.11(c) e (d)). Esse módulo conta também com outro grau de liberdade relacionado eixo da roda traseira, o que permite o movimento com maior flexibilidade em relação a irregularidades do pavimento. A representação do dispositivo em operação passando por um obstáculo no pavimento está representado na Figura 2.11(b).

O eixo de sustentação e o elemento de suporte que acopla o módulo à cadeira estão ilustrados na Figura 2.11(d). O conjunto completo de motorização pode ser adquirido no mercado pelo valor aproximado de US\$ 5.600,00.

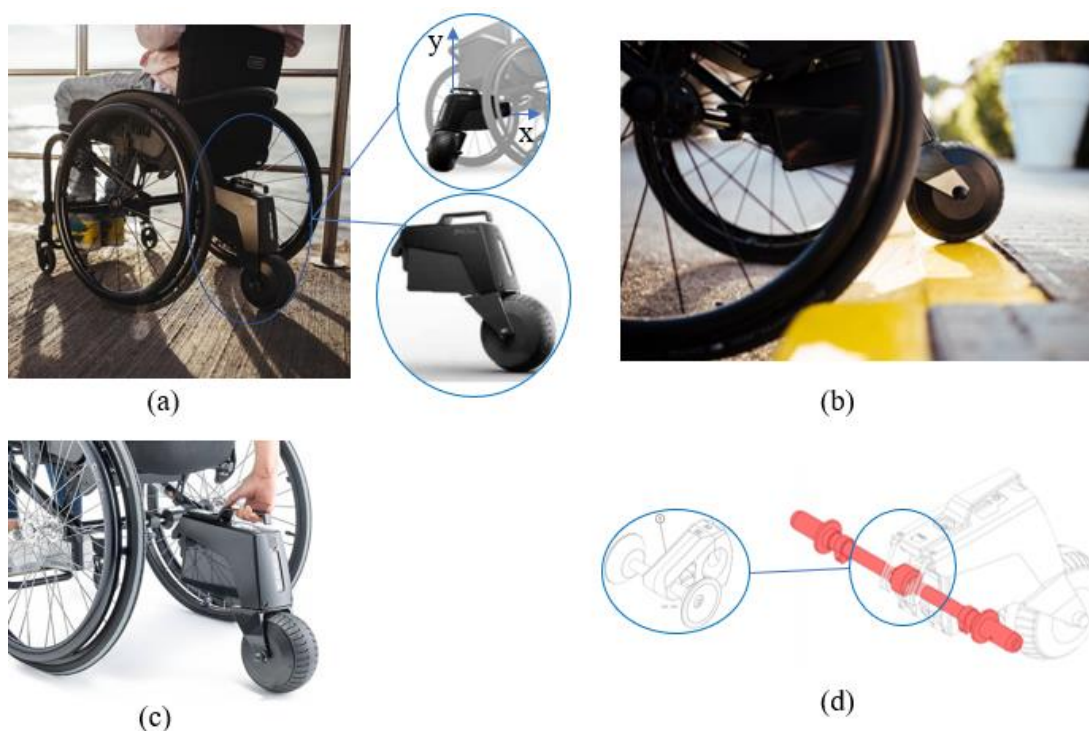


Figura 2.11 – Módulo de “Smoov” (a) Conjunto anexado, (b) Aplicação do módulo, (c) Anexando/Removendo a unidade de tração, (d) Dispositivo de engate. Adaptado (Sports, 2020).

O segundo modelo comercial analisado do tipo RT, é conhecido como “*Smart Drive MX2*”, ilustrado na Figura 2.12, que apresenta como componentes principais do módulo, a unidade de tração, o conjunto de baterias, os botões de aceleração pelo polegar e a pulseira de comando, todos representados na Figura 2.13(a) e (b) conforme a (Mobilit, 2018).

O controle disponibilizado para essa unidade de tração pode ser obtido por duas maneiras, a primeira pela montagem dos dois botões de aceleração, um de cada lado da cadeira, conforme ilustrado na Figura 2.13(a), e a outra opção de controle é através da pulseira (Figura 2.13(b)).

Enquanto o sistema de transmissão de dados entre a unidade de tração e os botões são feitos por cabos, a transmissão de informação pela pulseira é realizada via *Bluetooth*.

O modo de esterçamento deste dispositivo de RT é concedido por um par de rodas omnidirecionais de movimento independente que gera uma força resultante em qualquer direção sobre o plano de contato do pavimento. Como isso, permite a manobrabilidade do conjunto motorizado.

Assim como o exemplo anterior, este dispositivo segundo Mobilit (2018) é caracterizado como grau auxiliar de tração, precisando que parte da força de impulso seja fornecida pelo usuário ou pela pessoa assistente.

O modo de acoplamento do módulo “*Smart Drive MX2*”, é semelhante ao primeiro módulo apresentado e ilustrado na Figura 2.11(c) e (d), e para ambas as cadeiras de rodas, o passo a passo da montagem da unidade de tração ao eixo da roda traseira é apresentado conforme indicação na Patente de Richter e Mark (2021), representado pela Figura 2.16. Esse conjunto completo de motorização tem o custo aproximado de US\$ 6.800,00.

Além dos dois exemplos citados anteriormente, o Ogilvie, C., M. Khalili, Hfm Van Der Loos (2018), outros modelos motorização do tipo RT existentes no mercado são: Benoit Light Drive (Speedy Snail Mobility) e ZX-1 (Spinergy).



Figura 2.12 – Módulo de Reboque traseiro “*Smart Drive MX2*”. Adaptado (“AC Mobility”, 2020) e (“Push Mobility”, 2020).

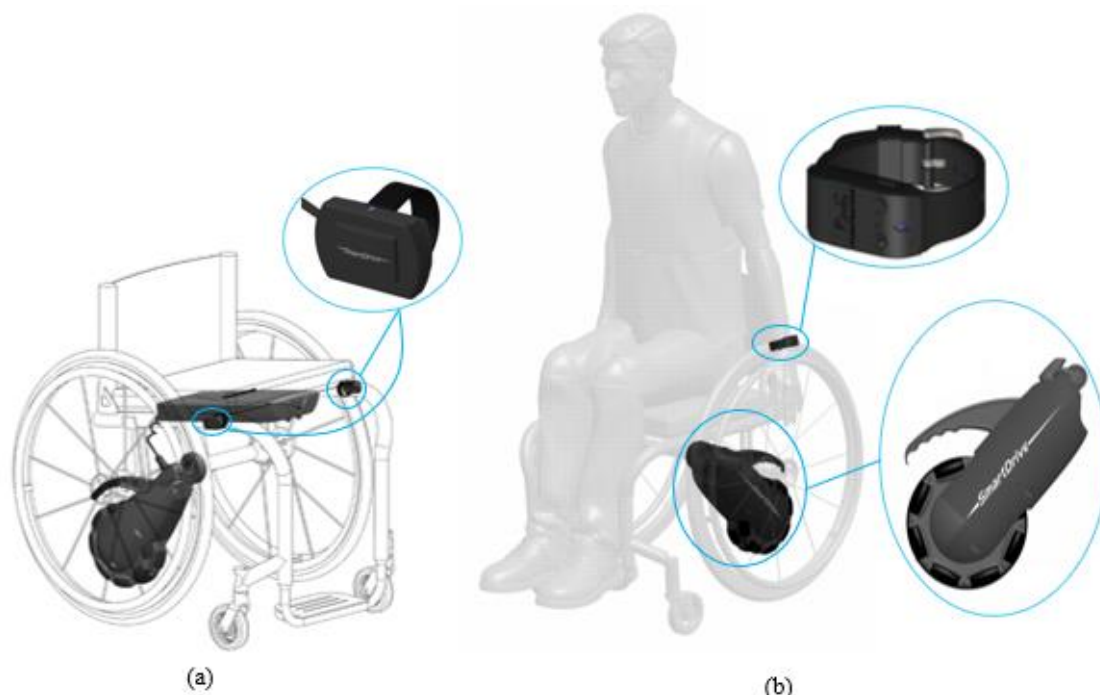


Figura 2.13 – Unidade de tração e controle do módulo “*Smart Drive MX2*”. Adaptado (MOBILIT, 2018) e (“AC Mobility”, 2020).

A motorização do tipo RT, analisada na patente de Yincong e Tianjiao (2020) apresentam características desta tipologia de motorização por Reboque Traseiro. A Figura 2.14 é facilmente comparada a representação do modelo comercial analisado na Figura 2.12. E essa aplicação pode ser válida para a operação do próprio usuário ou pelo assistente.

Outra característica dessa patente que vale ressaltar é a possibilidade de ser configurada também para o tipo Reboque Central. Se o ponto de engate da unidade de tração na cadeira de rodas ocorrer no eixo da roda traseira, então será do tipo RT (Figura 2.14), mas se o acoplamento do módulo ocorrer a frente do eixo da roda traseira, o ponto de contato da roda motorizada com o piso pode coincidir com o ponto de contato da roda traseira, configurando o tipo RC, representado na Figura 2.41 e Figura 2.42, da seção 2.3.3.

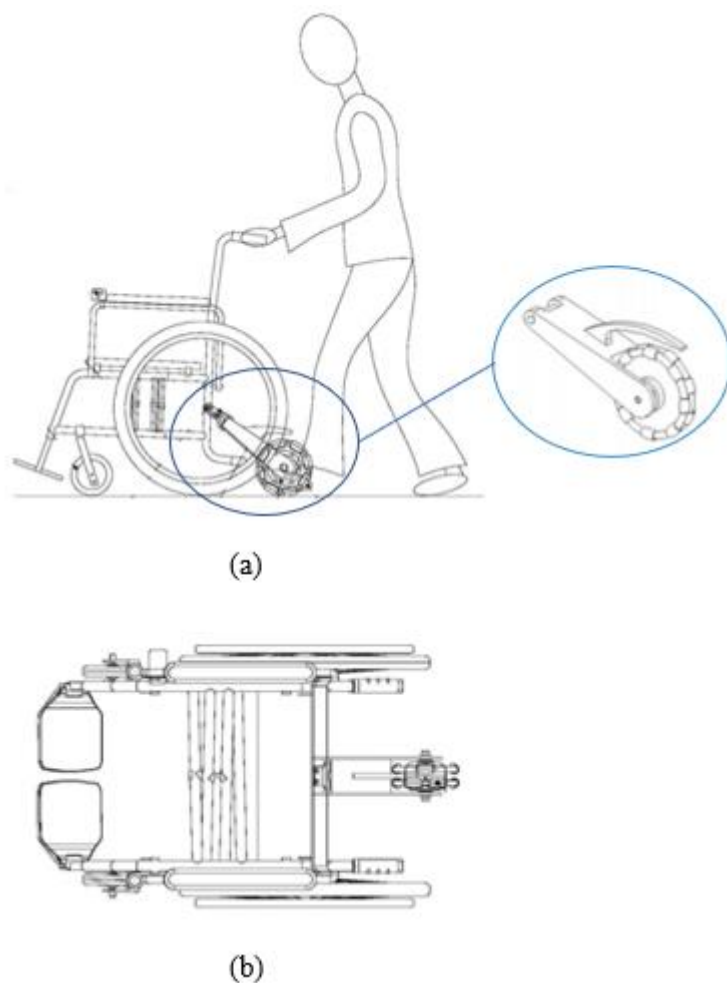


Figura 2.14 – Esquematização do RT. Adaptado (Yincong e Tianjiao, 2020).

A patente de Richter e Mark (2021), cujo título original em espanhol é “*Sistema de asistencia de movimiento para sillas de ruedas*”, apresenta uma configuração de Reboque Traseiro, com engate no eixo principal da roda traseira da cadeira de rodas (Figura 2.15), onde a indicação 1 representa a unidade de tração, a 2 representa o ponto de anexação do item 1 com a cadeira de rodas mecanomanual, e o item 3 representa o armazenador de energia.

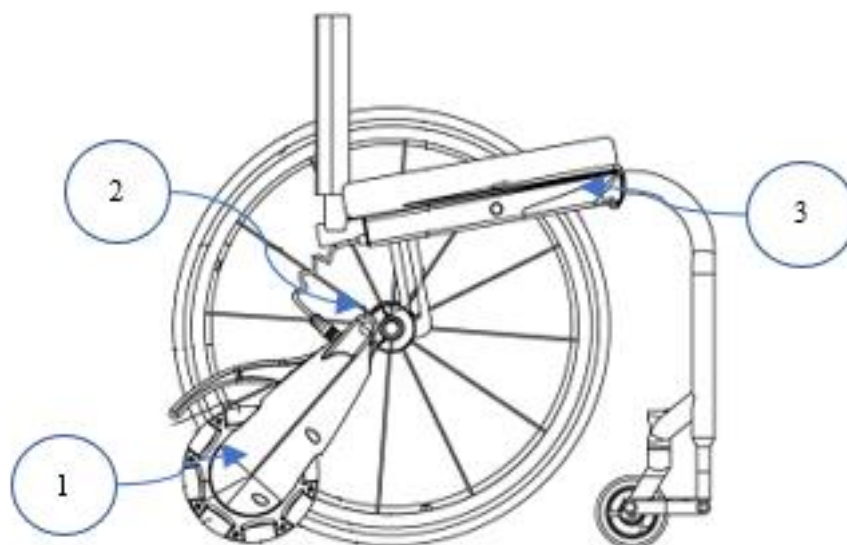


Figura 2.15 – Elementos do conjunto de RT. Adaptado (Richter e Mark, 2021).

O processo de montagem da unidade de tração do RT à cadeira de rodas manual é representado na Figura 2.16 pela sequência indicada por setas e nos balões estão representados o detalhamento do posicionamento, bem como o movimento requerido ao acoplamento.

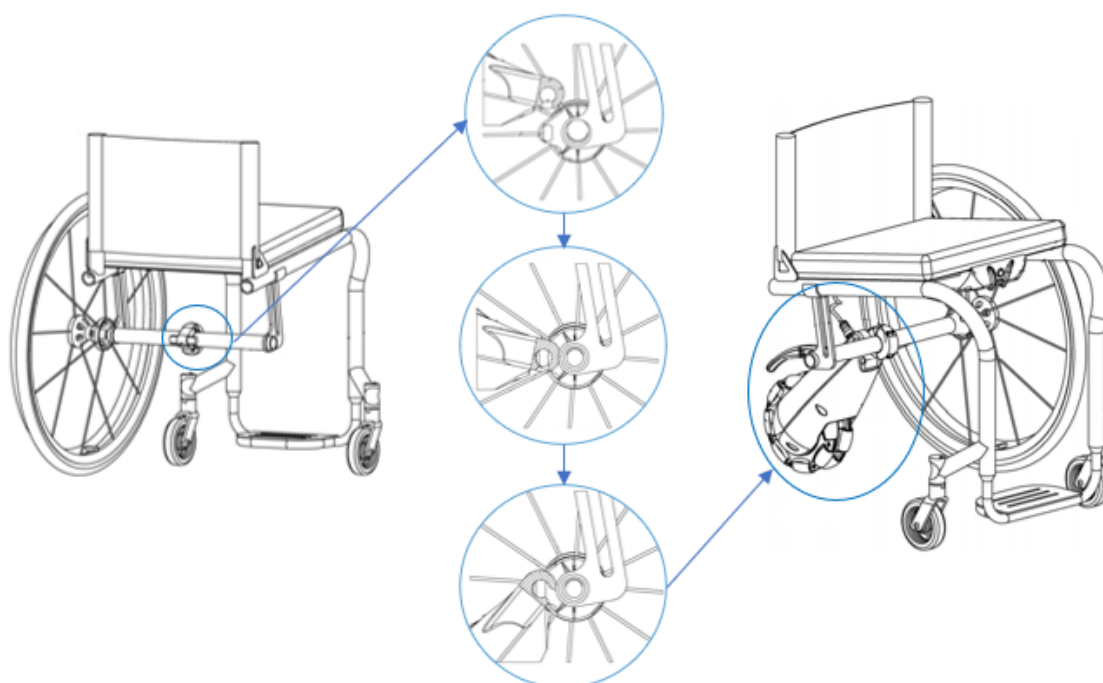


Figura 2.16 – Esquemática de montagem de RT, semelhante ao módulo “*Smart Drive MX2*”. Adaptado (Richter e Mark, 2021).

A patente de Dedini e Alvarenga (2006), cujo título é “Módulo de locomoção para motorização de veículos e cadeira de rodas manual convencional convertida em cadeira de rodas motorizada”, apresenta uma unidade de tração, conforme representa a Figura 2.17(b), e configurada como RT, Figura 2.17(a). O conjunto apresenta possibilidade de engate rápido, o que permite maior acesso das pessoas leigas durante o acoplamento/desacoplamento do módulo à cadeira de rodas.

Dessa forma esta unidade de tração pode ser disponibilizada em ambientes públicos, a fim de facilitar o deslocamento dos usuários. A Figura 2.17(a) ilustra o conjunto motorizado em perspectiva, e evidencia uma desvantagem desse módulo, a manobra é dificultada devido a reduzida mobilidade de esterçamento do módulo com as rodas tradicionais.

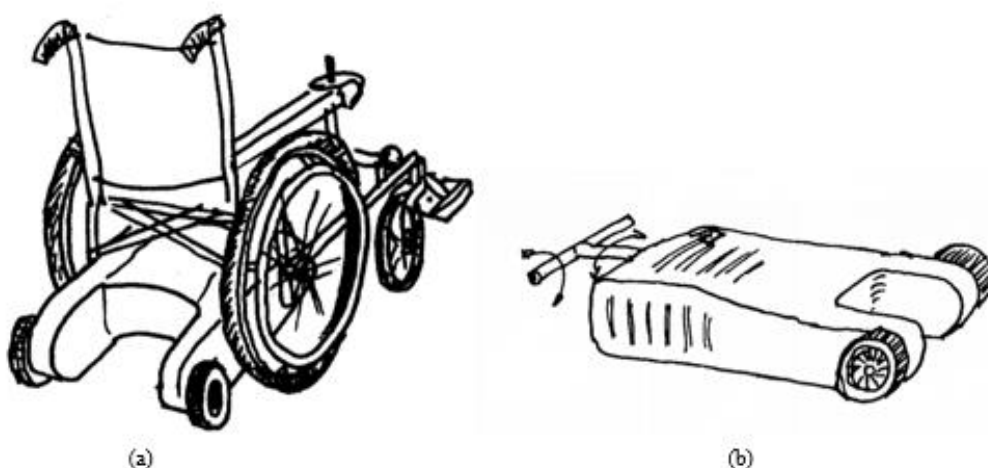


Figura 2.17 – Representação do conjunto motorizado em perspectiva da patente “Módulo de locomoção para motorização de veículos e cadeira de rodas manual convencional convertida em cadeira de rodas motorizada”.

Adaptado (Dedini e Alvarenga, 2006).

A patente com o título “*Wheelchair stair assist apparatus*”, é apresentada pelo inventor Rembos et al. (2011) como um módulo seguro que traz ao usuário maior conforto inclusive quando se deseja ultrapassar obstáculos com aclive e declive seja por rampas ou escadas. Nessas condições a unidade de tração apresenta um elemento de encosto de cabeça representado no conjunto montado na Figura 2.18, o que confere maior comodidade no deslocamento fora do plano horizontal.

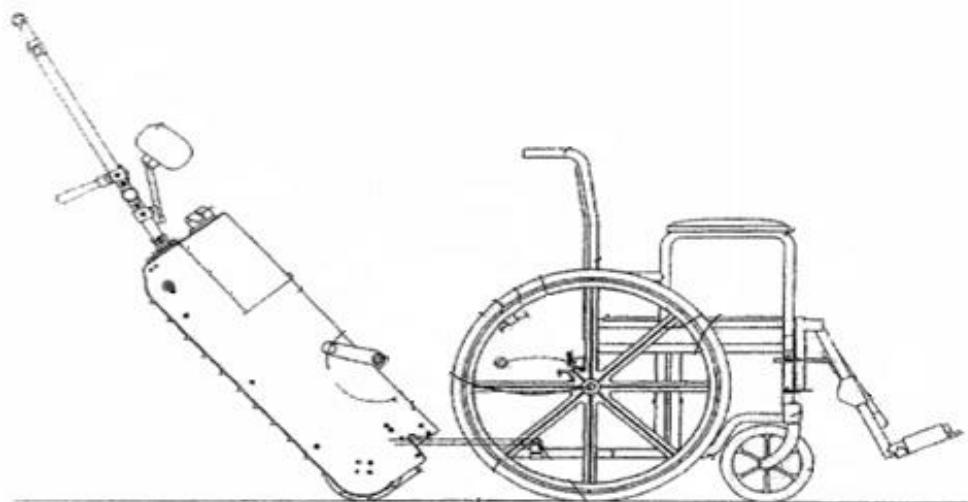


Figura 2.18 – Unidade de tração traseira, para sobreposição de active/declive conforme a patente “*Wheelchair stair assist apparatus*”. Adaptado (Rembos et al., 2011).

O dispositivo pode ser desconectado da cadeira de rodas quando não for mais solicitado, o equipamento está ilustrado na Figura 2.19(a). A representação dos componentes internos é representada na vista explodida do módulo na Figura 2.19(b).

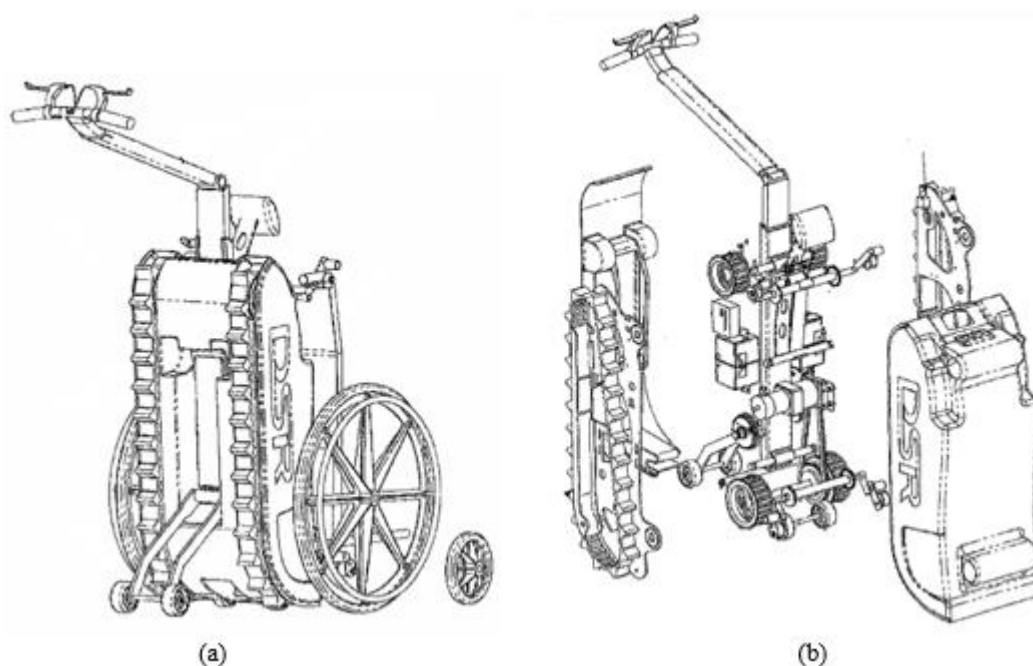


Figura 2.19 – (a) Módulo do RT em perspectiva, (b) Vista Explodida, ambas da patente “*Wheelchair stair assist apparatus*”. Adaptado (Rembos et al., 2011).

2.3.2 Reboque Dianteiro

Nesta subseção serão apresentados dois modelos comerciais, neles estão presentes uma junta de rotação para realização do esterçamento. O primeiro módulo é maior e mais robusto, enquanto o segundo é mais compacto e de fácil portabilidade durante o transporte, e para o mecanismo de engate o primeiro módulo apresenta maior tempo de anexação que o segundo.

O primeiro modelo comercial analisado é conhecido como “Firefly 2.5”, representado pela Figura 2.20(a). Este módulo (Figura 2.20(b)) apresenta como componentes principais a unidade de tração e os elementos de conexão física do módulo à cadeira.

Em (“RIO Mobility”, 2021) apresenta o modo de esterçamento pela junta de rotação representada na Figura 2.20(b) enfatizado pelo balão. Também contém os controles de movimento presentes no guidão, como os de velocidade, as maçanetas de freios, a chave de acionamento da unidade de tração, o painel de velocidade e de demonstrativo da capacidade de carga da bateria, conforme representado na Figura 2.21. Esta unidade de tração apresenta-se como GIT.



Figura 2.20 – Módulo “Firefly 2.5” e esquematização de RD. Adaptado (Mobility, 2019) e (“Adaptive Specialties”, 2021).



Figura 2.21 – Representação da unidade de controle do módulo “Firefly 2.5”. Adaptado (“Adaptive Specialties”, 2021).

A unidade de motorização do tipo RD, é anexada à cadeira por dispositivos de engate rápido, fixos no chassi, cujo posicionamento de fixação recomendado está representado pela Figura 2.20(c) e (d), e a representação da unidade separada da cadeira de rodas ou nela anexada estão ilustradas pela Figura 2.23(a) e (b) respectivamente. Já na Figura 2.22 o é ilustrado o conjunto completo. Pode ser adquirido pelo valor aproximado de US\$ 3.000,00.



Figura 2.22 – Representação em perspectiva do conjunto de RD do módulo “Firefly 2.5”. (“Adaptive Specialties”, 2021).

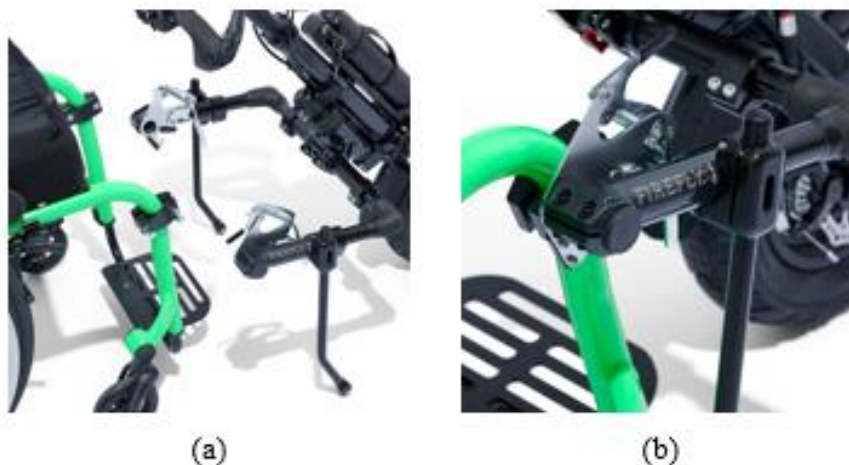


Figura 2.23 – Representação dos dispositivos de engate do módulo “Firefly 2.5”. (a) Removido, (b) Anexado.
(“Adaptive Specialties”, 2021).

O segundo modelo comercial analisado do tipo RD, representado pela Figura 2.24 é conhecido como “UNAwheel Mini”, apresenta como componentes principais do módulo, a unidade de tração e o dispositivo de acoplamento do módulo ao chassi da cadeira de rodas. (Care, 2019).



Figura 2.24 – Módulo “UNAwheel Mini”. (a) Representação em perspectiva, (b) Vista lateral, (c) Vista Frontal.
(“SYNC Living”, 2021).

Este módulo de Reboque Dianteiro apresenta o controle no guidão da unidade de tração, tanto o controle de direção provocado pelo esterçamento, quanto o controle de velocidade pelos “botões borboleta” nos punhos, ilustrado na Figura 2.25. Este módulo apresenta o grau de integral tração.



Figura 2.25 – Representação da unidade de tração do módulo “UNAwheel Mini”. Adaptado (“SYNC Living”, 2021).

O acoplamento deste dispositivo à cadeira é realizado por um movimento de alavanca da unidade de tração, e na junta de acoplamento apresenta também uma haste que se empurrada para frente provoca a abertura dos pinos de fixação do “UNAwheel Mini”. As etapas de anexação/remoção estão ilustradas na Figura 2.26.

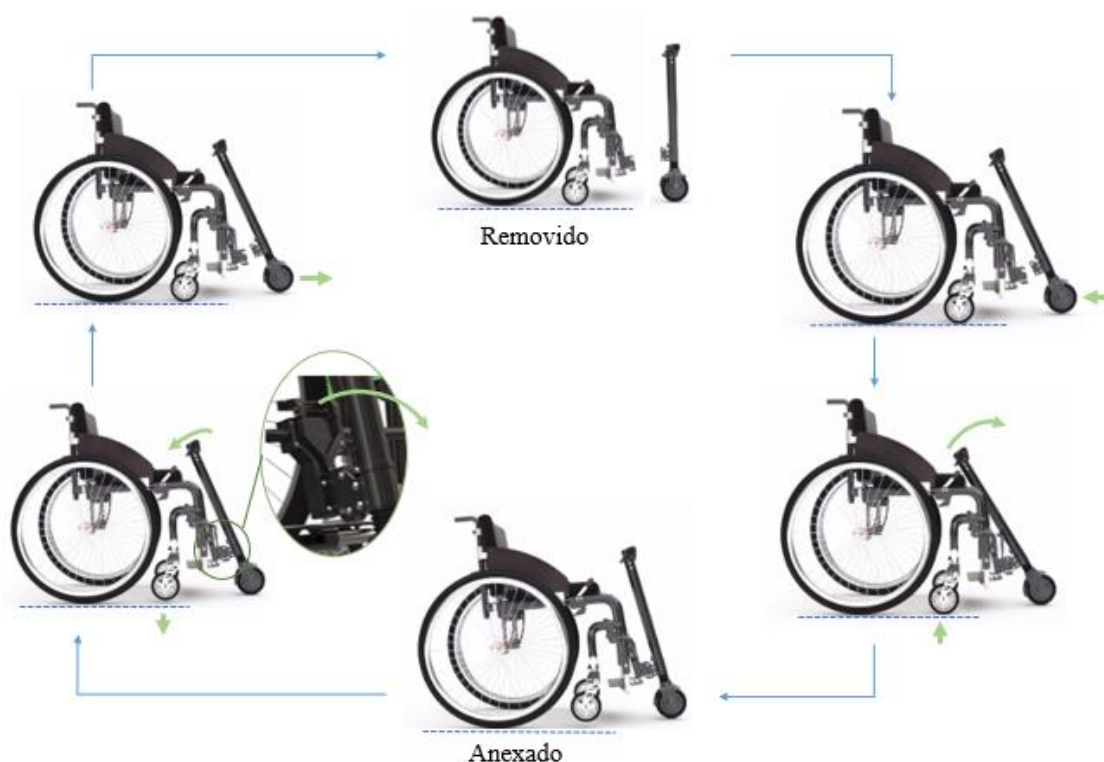


Figura 2.26 – Representação das etapas de Anexação/remoção do módulo “UNAwheel Mini” à cadeira de rodas manual. Adaptado (“2020 Mobility”, 2021).

Uma variação da montagem deste módulo, é representado pela Figura 2.27, que apresenta a tração da roda motriz na linha de contato dos rodízios. Desta forma o guidão de controle do esterçamento da cadeira é deslocado para uma posição mais próxima do corpo do usuário, além de permitir o controle direcional sem as mãos no guidão do módulo.

O módulo de motorização “UNAwheel Mini” do tipo RD, pode ser adquirido no mercado aproximadamente por US\$ 5.000,00.

Outros modelos presentes no mercado são: Companion Power Assist (Cheelcare), Electric (BATEC Mobility), Rapid (BATEC Mobility), Urban (BATEC Mobility), Raptor (Progeo), Triride (Triride Italia), E-Pilot (Alber GmbH).



Figura 2.27 – Representação do módulo “UNAwheel Mini basic”. (Care, 2019).

Segundo Alvarenga (2002), a inclusão de um módulo de propulsão do tipo Rebocador Dianteiro, tem como pretensão principal associar os benefícios presentes na cadeira de rodas puramente manual, com um módulo de propulsão.

As Cadeiras de rodas manuais apresentam vantagens como maior leveza, agilidade nas manobras, e facilidade no transporte, desde que seja uma cadeira de rodas dobrável, além de permitir a prática de exercício físico. E o módulo de propulsão contribui com a possibilidade de deslocamentos maiores e redução do esforço físico dos membros superiores.

A patente de Butts e Gowen (2013), cujo título é “*Manual wheelchair power assist*” apresenta um módulo de RD (Figura 2.28), com duas rodas de tração a frente e dois rodízios atrás do módulo. A unidade de tração é anexada à cadeira de rodas no ponto representado pelo item 1 da Figura 2.29(b). No módulo também estão os armazenadores de energia e o dispositivo de controle.

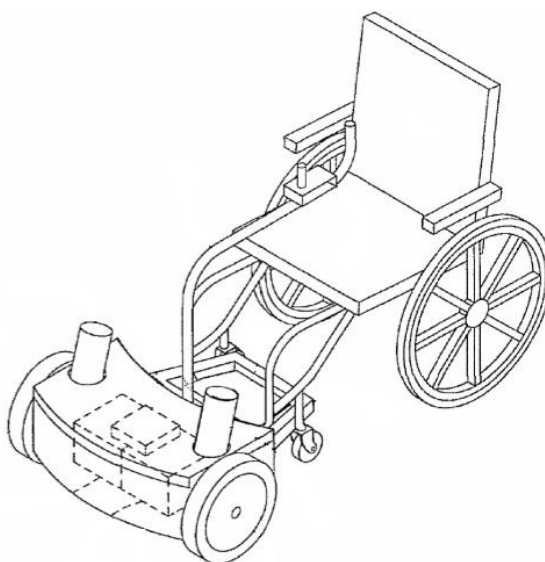


Figura 2.28 – Representação do conjunto motorizado por RD, da patente “*Manual wheelchair power assist*”. Adaptado (Butts e Gowen, 2013).

Na Figura 2.29(a) está representada a vista superior do módulo do reboque dianteiro, e na Figura 2.29(b) a vista lateral.

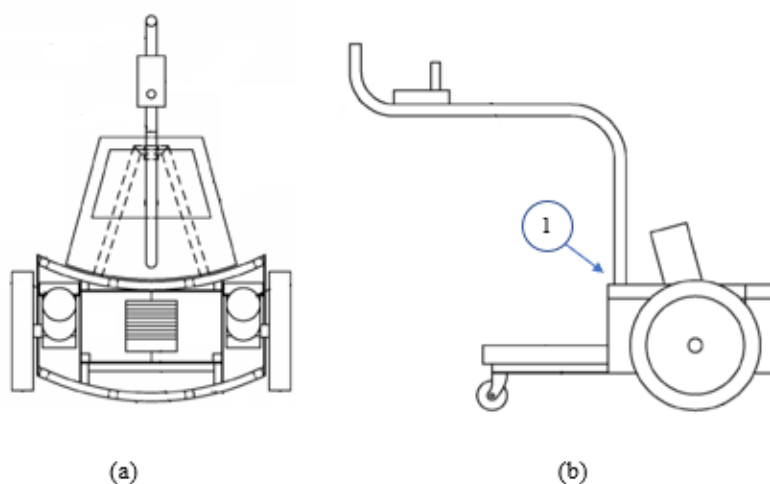


Figura 2.29 – Representação do módulo de RD da patente “*Manual wheelchair power assist*”. (a) Vista Superior, (b) Vista lateral. Adaptado (Butts e Gowen, 2013).

Outra patente analisada é a de Mills e Mills (2010), cujo título é “*Motorized scooter wheelchair attachment device*”, que apresenta uma “Scooter” como unidade de tração posicionada na frente da cadeira com a função de puxar a cadeira de rodas manual. O conjunto motorizado é representado pela Figura 2.30.

De acordo Mills e Mills (2010), esse conjunto motorizado apresenta uma aplicação principalmente ao público mais idoso, cuja redução de mobilidade é algo natural com o avanço da idade. A presença de uma plataforma com uma maior área de apoio dos pés, melhora o conforto do usuário. Outros usuários que apresentam perda de mobilidade temporária ou permanente por conta de lesão medular, também são potenciais usuários do conjunto motorizado.

A estrutura desse módulo é composta por elementos tubulares, dessa forma facilita a construção da estrutura de engate (Figura 2.31(a) a (c)).

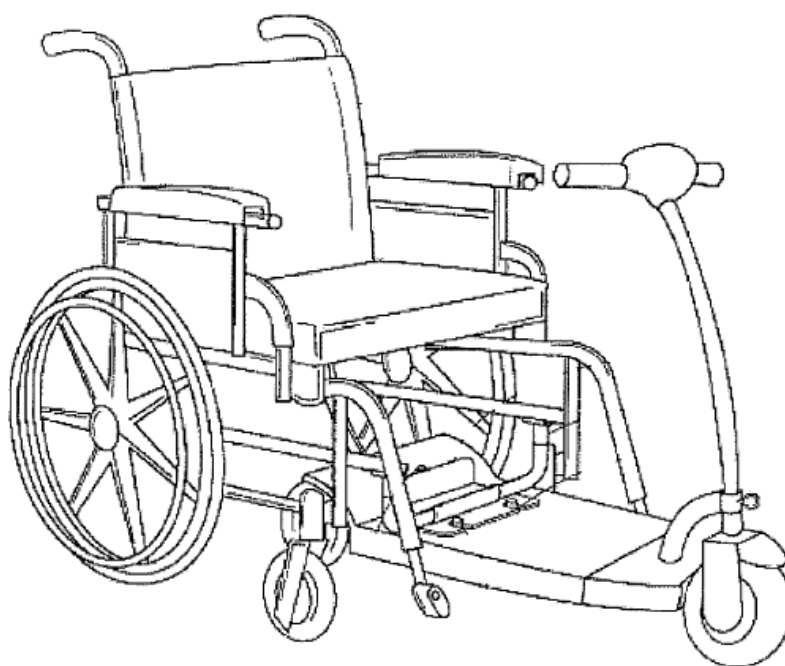


Figura 2.30 – Representação do Conjunto motorizado de RD da patente “*Motorized scooter wheelchair attachment device*”. Adaptado (Mills e Mills, 2010).

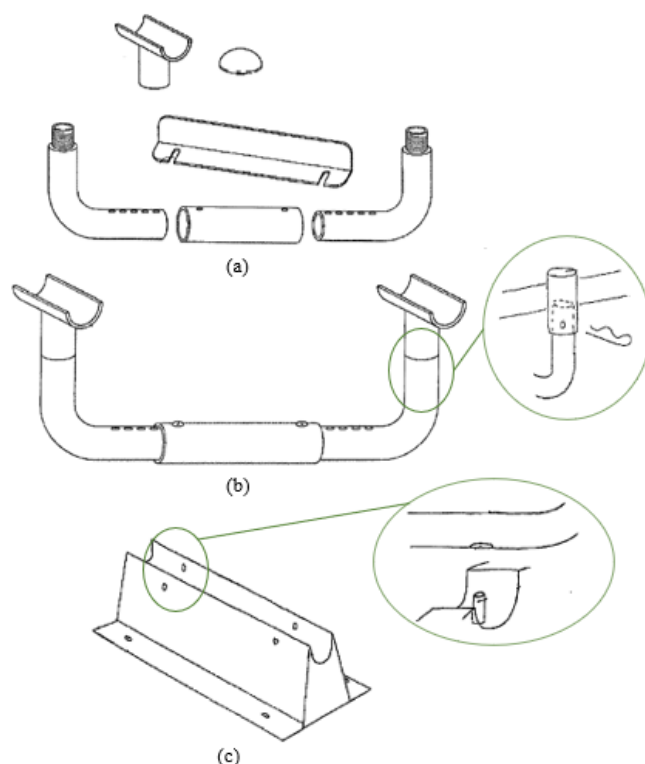


Figura 2.31 – Representação do dispositivo de acoplamento do módulo de RD da patente “*Motorized scooter wheelchair attachment device*”. (a) Vista explodida do dispositivo, (b) Trava de segurança, (c) Trava de fixação. Adaptado (Mills e Mills, 2010).

2.3.3 Reboque Central

Nesta subseção, os módulos de motorização apresentam a unidade de tração normalmente localizada na posição central e abaixo da cadeira de rodas.

Serão apresentados dois modelos comerciais, um com a unidade de tração fixa no chassi da cadeira de rodas, e o outro como uma unidade de reboque auxiliar que acopla na cadeira para a movimentação.

O primeiro modelo comercial analisado é conhecido por “*Powerpack*”, ilustrado na Figura 2.32(a). Este módulo apresenta quatro versões do modelo e para aplicações mais específicas são indicados pelo (“*SYNC Living*”, 2020):

1. Wheelchair powerpack SOLO, composto por uma roda motriz, apresenta menor custo, menor peso e é indicado para pavimentos mais regulares e planos (Figura 2.32(b)).

2. Wheelchair powerpack DUO, composto por duas rodas motrizes, conseqüentemente maior aderência ao piso, e pode ser aplicado em pavimentos com inclinação e/ou mais escorregadios (Figura 2.32(c)).

3. Wheelchair powerpack DUO HD, se diferencia do anterior pela maior capacidade de carga (Figura 2.32(c), mesmas dimensões externas do Wheelchair powerpack DUO).

4. Wheelchair powerpack PLUS, destinado preferencialmente a usuários obesos ou bariátricos, e com controle de suavidade que contrasta dos demais (Figura 2.32(c), mesmas dimensões externas do Wheelchair powerpack DUO).



Figura 2.32– Representação do módulo “Powerpack”. (a) Conjunto anexado a cadeira de rodas manual, (b) “Wheelchair powerpack SOLO”, (c) “Wheelchair powerpack DUO”, “DUO HD” e “PLUS”. (“SYNC Living”, 2020).

Este módulo é composto pelos seguintes componentes, a unidade de tração, o armazenador de energia, a barra de suporte do módulo, o dispositivo de controle e a fita de sustentação, todos estão representados na Figura 2.33(a). O modo de esterçamento da cadeira não sofre restrição de movimento com a tipologia de RC. Este modelo é controlado pelo dispositivo no punho (Figura 2.33(b)) através de um assistente e apresenta grau auxiliar de tração.

O módulo “Powerpack”, pode ficar acoplado à cadeira e quando não for utilizado a(s) roda(s) motriz(es) são colocadas em suspensão pela fita de sustentação, que é realizada por uma

pessoa que esteja auxiliando o usuário de cadeira de rodas. A partir das quatro opções de módulo, a faixa de valor de mercado varia entre US\$ 900,00 e US\$ 1.700,00.

Outros modelos presentes no mercado são: “*Power Glide*”, o “*U-Drive*” e o “*Movilino pushing & braking aid for wheelchairs*”.



Figura 2.33 – (a) Representação dos componentes do módulo “*Powerpack*”, Unidade de controle. (“Merits Australia”, 2021).

O segundo modelo comercial analisado é conhecido como “*ZX-1*”, representado na Figura 2.34. Este módulo não apresenta componentes separáveis que fazem parte da montagem do conjunto motorizado.



Figura 2.34 – (a) Representação do conjunto motorizado pelo RC “*ZX-1*”, (b) módulo “*ZX-1*”. (“Spinergy”, 2021).

O controle disponibilizado para esse módulo é um conjunto de botões e *Joystick* disposto no braço da cadeira que é a própria extensão da unidade de tração. O acoplamento na cadeira de rodas é realizado por um mecanismo de engate no eixo da roda traseira da cadeira, a Figura 2.36(a) representa o engate aberto e a Figura 2.36(b) representa o engate fechado. O processo de acoplamento do módulo dispensa o auxílio de um assistente e é uma unidade com grau integral de tração, pode ser adquirido no mercado aproximadamente por US\$ 8.500,00.

A patente de Tallino (2013), cujo título é “*Power add-on device for manual wheelchair*” apresenta uma unidade de tração representado pela Figura 2.35, bem semelhante ao módulo comercial “ZX-1”.

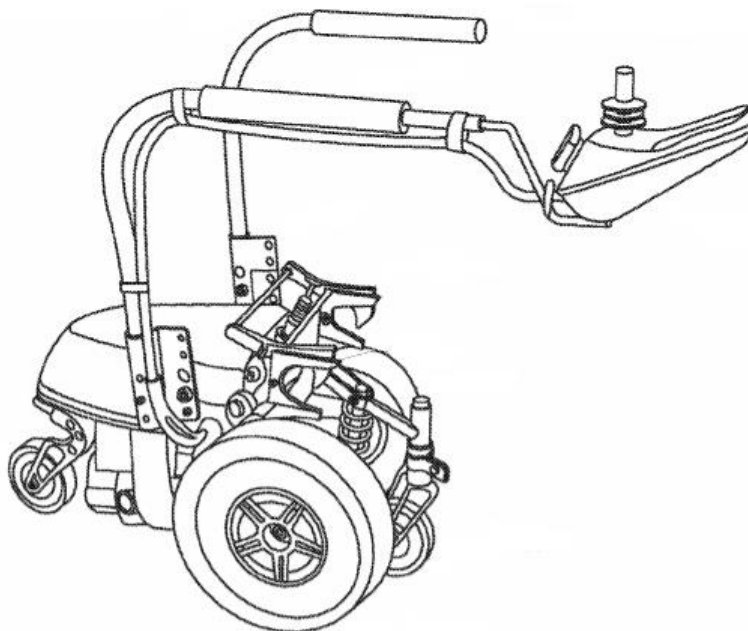


Figura 2.35 – Representação do módulo de RC, da patente “*Power add-on device for manual wheelchair*”.

Adaptado (Tallino, 2013).

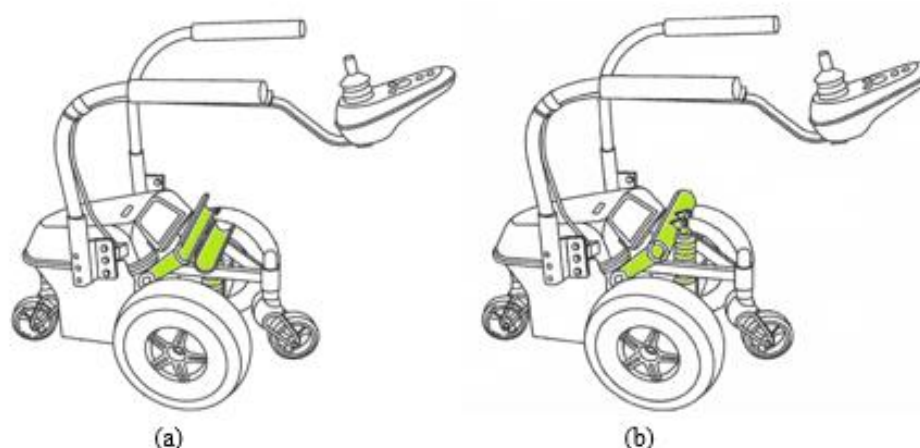


Figura 2.36 – a) Representação do dispositivo de engate aberto, (b) Representação do dispositivo de engate fechado. Adaptado (Tallino, 2013).

A patente de Dedini, Silva e Hanzawa (2013), de título “Kit de motorização para cadeira de rodas e veículo auto guiado”, apresenta o modelo desenvolvido para a propulsão de cadeira de rodas manuais, com aplicação no auxílio de pessoas que apresentam dificuldade de locomoção, e podem usar o módulo como suporte de propulsão. A esquematização da unidade de tração está ilustrada pela Figura 2.37.

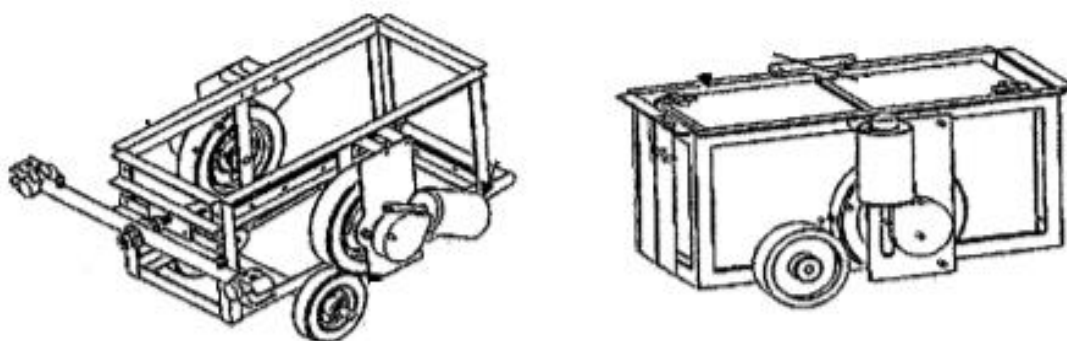


Figura 2.37 – Representação da estrutura física do módulo de potência da patente “Kit de motorização para cadeira de rodas e veículo auto guiado”. Adaptado (Dedini, Silva e Hanzawa, 2013).

O desenvolvimento desse protótipo foi também detalhado na tese de Silva (2011), onde o módulo de controle foi desenvolvido para percorrer um caminho desejado a partir de uma linha demarcada no piso, conforme ilustrado na Figura 2.38.

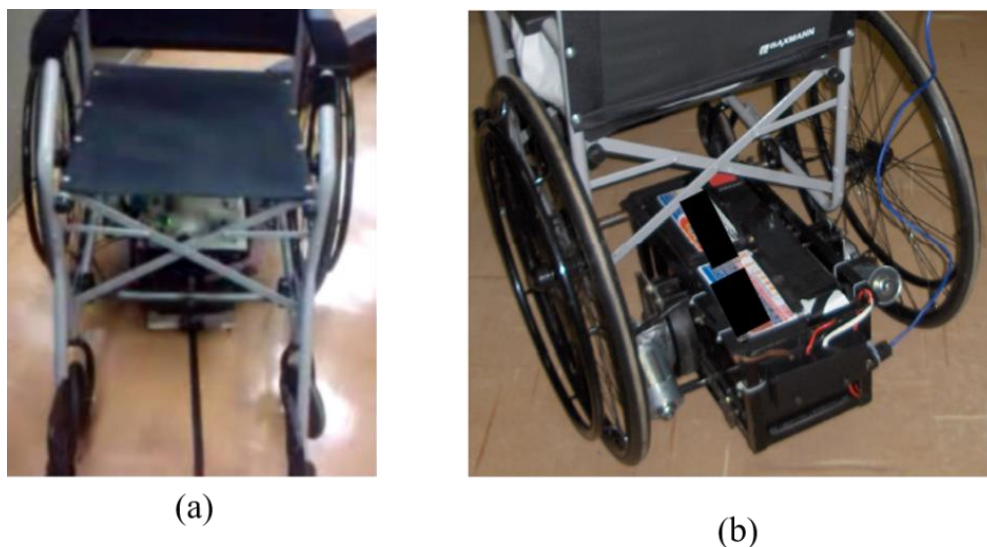


Figura 2.38 – (a) Representação do kit de motorização preparado para seguir marcação no piso (Silva, 2011), (b) Vista em Perspectiva posterior da montagem do Kit de motorização central. (Delgado Neto et al., 2008).

O processo de desenvolvimento desse protótipo foi elaborado utilizando o estudo de viabilidade na metodologia de projeto.

A partir do QM e do protótipo desenvolvidos no trabalho de Delgado Neto et al. (2008), nota-se que a estrutura do chassi do kit de motorização foi construída em tubo de aço com perfil quadrado e também com cantoneiras, além de duas baterias automotivas de 12V com capacidade de 33Ah e dois motores de 24V, Modelo F006.WMO.310 da Bosch (Potência mecânica igual a 16W).

A transmissão de potência do motor até a roda motriz ocorre através do contato de dois pneus maciços, o primeiro de 6 polegadas ligado ao eixo de transmissão do motor e o segundo de 4 polegadas em contato com o piso.

Todo o módulo de propulsão é acoplado ao chassi da cadeira de rodas através de uma haste horizontal, que permite a articulação entre a cadeira de rodas, módulo e o piso.

A patente de Richter (2016), cujo título é “*Assistive driving system for a wheelchair*”, é composta por um sistema de sensores de movimento, e a leitura dos sensores auxilia o usuário na condução da cadeira de rodas, esse sistema apresenta-se como GAT. O controle é realizado pela pulseira de comando, representado na Figura 2.40, para poder conduzir o conjunto motorizado, ilustrado pela Figura 2.39.

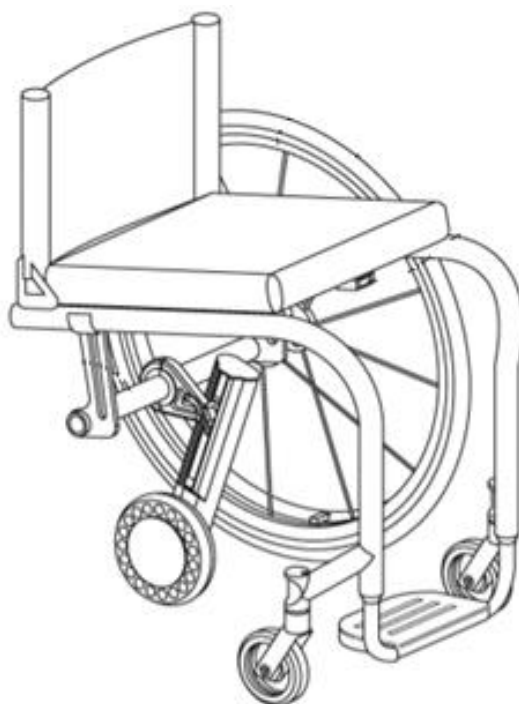


Figura 2.39 – Representação do conjunto motorizado da patente é “*Assistive driving system for a wheelchair*”. Adaptado (Richter, 2016).

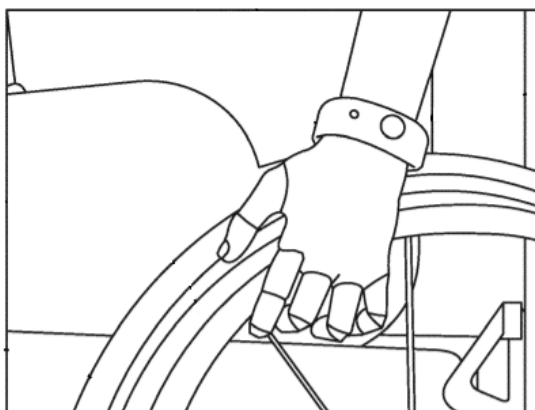


Figura 2.40 – Representação da pulseira de controle da unidade de tração do tipo RC da patente “*Assistive driving system for a wheelchair*”. Adaptado (Richter, 2016).

Outra patente analisada, apresenta uma configuração mista para dois tipos, a de RT apresentado na subseção 2.3.1 e a de RC representado na Figura 2.41 e Figura 2.42 . Esta patente de título “*Assistive driving system for a wheelchair*” de Yincong e Tianjiao (2020) apresenta uma cadeira de rodas mecanomanual com uma unidade de tração com GAT, que é conduzida pelo usuário ou assistente.

A Figura 2.41 representa uma vista lateral do conjunto motorizado e a Figura 2.42 ilustra a vista superior, que está configurado para tipo de RC a roda passa a ser do tipo tradicional, enquanto que para configuração do tipo RT obrigatoriamente o módulo é configurado para uma roda omnidirecional.



Figura 2.41 –Representação do conjunto motorizado da patente “Assistive driving system for a wheelchair” com a configuração em RC. Adaptado (Yincong e Tianjiao, 2020).

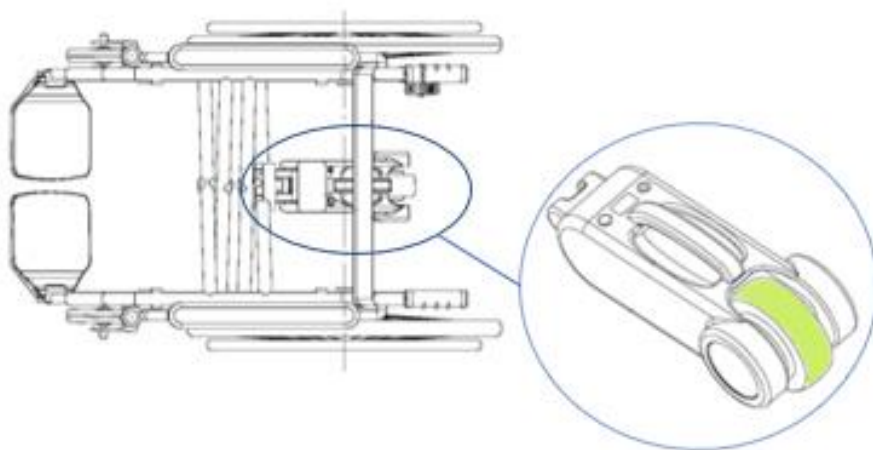


Figura 2.42 –Visa superior do conjunto motorizado da patente “Assistive driving system for a wheelchair” com a configuração em RC. Adaptado (Yincong e Tianjiao, 2020).

2.3.4 Motorização do Rodízio

Segundo Munakata, Tanaka e Wada (2015), a modelagem da posição do rodízio foi realizada de forma generalizada, no entanto é descrito pelo autor que a roda motriz normalmente é posicionada na linha central da cadeira de rodas. Esta condição difere da localização tradicional de uma cadeira de rodas manual. Na Figura 2.43(a) representa o esquema para análise do modelo, na Figura 2.43(b) representa o modelo computacional do mecanismo da unidade propulsora do rodízio.

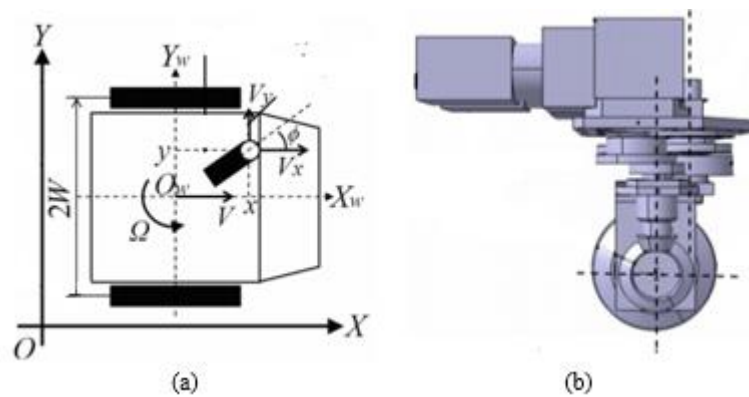


Figura 2.43 – (a) representação genérica das coordenadas do rodízio de uma cadeira de rodas manual. (b) Modelagem computacional do mecanismo de MR. Adaptado (Munakata, Tanaka e Wada, 2015).

2.3.5 Motorização do Cubo da Roda Traseira

A substituição de um par de rodas convencionais por outro par de rodas com MCT, apresenta relativa facilidade na conversão do sistema de cadeiras mecanomanual pelo motorizado. Nesta subseção são analisados dois modelos comerciais de MCT.

O primeiro módulo analisado é conhecido como “*E-Motion25*” (Figura 2.44) e os componentes são duas rodas motorizadas no cubo, fonte de energia, eixo de fixação da roda com mecanismos de engate rápido e controle remoto *Bluetooth*, todos representados na Figura 2.45.



Figura 2.44 – Representação do módulo “E-Motion25”. (“Alber GmbH”, 2021).



Figura 2.45 – Representação dos componentes do módulo “E-Motion25”. (“Alber GmbH”, 2021) e (GmbH, 2018).

A conversão da cadeira de rodas manual para motorizada, se dá praticamente com a mudança do par de rodas traseiro, e o modo de esterçamento é semelhante ao da configuração manual.

O controle de movimento da cadeira de rodas pode ser de duas formas, primeiramente pelo impulso dado no aro de propulsão da cadeira, e nesse caso confere à cadeira um grau auxiliar de tração que evita lesões de articulações dos membros superiores. O outro tipo de controle é por controle remoto, com comunicação via *Bluetooth*, representado na Figura 2.45(b).

O modo de controle pode variar a depender da necessidade do usuário, que pode ter tido sua capacidade motora comprometida permanente devido a lesão medular, conforme representação da

Tabela 2.1, ou por qualquer lesão temporária que causa déficit bilateral de força ou coordenação motora do corpo humano. Com isso o sistema de controle faz a leitura dos sensores e na sequência impõe comando de potência diferente aos motores para compensação da força (“Burbach + Goetz”, 2021).

Esse módulo pode ser adquirido no mercado aproximadamente pelo valor de US\$ 13.000,00 o par de rodas.

O segundo módulo comercial analisado é conhecido como “*Alber e-fix35*” (Figura 2.46) que apresenta versões com variações de potência para diferentes capacidades de carga.



Figura 2.46 – Representação do conjunto motorizado pelo módulo de MCT “Alber e-fix35”. Adaptado (“Iaccess”, 2021).

Os componentes para montagem do conjunto motorizado são: Duas rodas motorizadas, duas hastes de suporte antitombamento (que servem também para suporte da cadeira durante a troca das rodas), dispositivo de controle (tanto do usuário, como do assistente) e armazenadores de energia, todos enfatizados nos balões da Figura 2.46.

Este módulo de motorização pode ter tração do tipo GIT, GAT ou ser desacoplado quando colocado no modo manual, feito pelo giro da tampa externa de proteção da roda, conforme ilustrado na Figura 2.47.

O módulo Alber e-fix35, pode ser adquirido por valor de US\$ 5.000,00 o par de rodas.

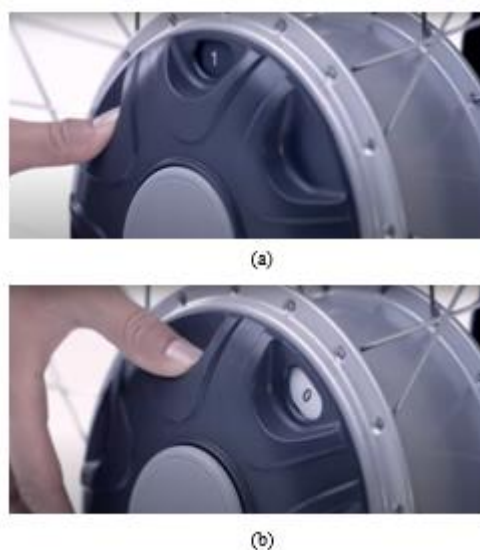


Figura 2.47 – Representação da tampa externa do cubo da roda, (a) Acoplado, (b) Modo livre. Adaptado (GmbH, 2013).

Para Motorização do Cubo da Roda Traseira, o mercado oferece alternativas, além das que foram citadas anteriormente, como o Twion wheel (Alber), Z-50(Ottobock), E-Suport (Ottobock), Wtender (Ottobock), WheelDrive (Quickie), Servo (AAt), Solo (AAt), JWX-2 (Yamaha).

A patente de Edmund F. Lopresti (2005), cujo título é “*Power apparatus for wheelchairs*”, apresenta um conjunto de MCT, que também agrega sensores de posição e detecção de obstáculos, ampliando a funcionalidade da cadeira de rodas. A Figura 2.48 ilustra duas perspectivas do módulo montado.



Figura 2.48 – Representação em perspectiva do protótipo da cadeira de rodas motorizada no cubo da roda traseira. (Simpson et al., 2005).

2.3.6 Motorização por Engrenamento ou por Atrito

A MEA apresenta uma configuração cujos componentes são de motor elétrico e transmissão localizados na porção posterior da cadeira de rodas ou na porção anterior, na região que substitui os manetes de freio manual (Item 7 da Figura 2.3), também um dispositivo de controle de movimento e um armazenador de energia. A potência é transferida as rodas através de atrito ou engrenamento.

2.3.6.1 Motorização por engrenamento

O modelo comercial utilizado para avaliar o tipo de motorização de cadeira de rodas manual por engrenamento na roda traseira é conhecido como “Max-e” (Figura 2.49). Os elementos que compõe este módulo são: a unidade de potência, o armazenador de energia, fonte de energia, dispositivo de controle e a engrenagem de fixação no aro da roda traseira, todos esses itens estão representados na Figura 2.50.



Figura 2.49 – Representação do conjunto motorizado pelo módulo “Max-e” do tipo MEA, com transmissão por engrenamento. (“AAT Asia”, 2021).



Figura 2.50 – Componentes do módulo “Max-e”. Adaptado (“Casadapta”, 2014).

O módulo de transmissão por engrenamento, apresenta uma engrenagem interna acoplada ao aro da roda da cadeira e um pinhão acoplado ao sistema de transmissão do módulo de motorização, o engrenamento é evidenciado pela Figura 2.52(a). A transmissão de potência é realizada na porção posterior da cadeira.

Este módulo apresenta uma guia de engate que facilita a anexação/remoção da unidade de tração à cadeira de rodas (Figura 2.51), já a conexão das engrenagens é acionada por um sistema pneumático, isso confere ao módulo a possibilidade do desacoplamento, mantendo o módulo ainda fixo na cadeira de rodas. (“AAT Asia”, 2021).



Figura 2.51 – Representação do dispositivo de engate do módulo “Max-e”. Adaptado (“Casadapta”, 2014).

A unidade de tração é do tipo integral, o que permite ao usuário ou assistente controle total sem colocar esforço físico de propulsão. O conjunto de motorização pode ser adquirido no mercado pelo valor aproximado de US\$ 5.800,00.

Outros três exemplos deste produto são uma variação do módulo “Max-e”, são eles:

1. “**Max-e**”, para crianças (Figura 2.52(b)).
2. “**V-Max**”, dispositivo de controle nos punhos para que seja auxiliado por outra pessoa, (Figura 2.52(c)).
3. “**V-Max+**”, para pacientes obesos e bariátricos, cuja largura do acento pode variar de 60 a 85cm (Figura 2.52(d)).



Figura 2.52 – Representação do módulo de transmissão por engrenamento (a) “Max-e”, (b) “Max-e” infantil, (c) “Max-4”, (d) “V-Max+”. (“AAT Asia”, 2021) e (“Think Mobility”, 2021).

2.3.6.2 Motorização por Atrito

Nesta subseção, dois modelos comerciais de Motorização por Atrito serão analisados. Um exemplo de contato na região posterior e o outro na região anterior da cadeira de rodas.

O primeiro modelo analisado é conhecido como “*Light Drive Power Assist*”, representando pela Figura 2.53. Este modelo apresenta três configurações possíveis:

1. **Light Drive**, quando o controle fica sob domínio do usuário e apresenta o grau integral de tração, o conjunto motorizado é ilustrado pela Figura 2.53(a).

2. **Mini Light Drive**, módulo com características semelhantes ao módulo “Light Drive”, no entanto apresenta tamanho reduzido, destinado especialmente para o acoplamento em cadeira de rodas infantil.

3. **Light Assist**, quando controle desta cadeira de rodas fica sob domínio do assistente, módulo representado pela Figura 2.53(b).

As três configurações deste modelo de transferência de potência, por atrito, são realizadas entre o rolo do sistema de transmissão e a roda traseira, através da região radial mais externa do pneu, ou seja, na mesma região de contato também entre o pneu com o piso.

O módulo “*Light Drive*” possui valor de mercado aproximadamente de US\$ 11.500,00.



Figura 2.53 – (a) Representação do módulo “*Light Drive*”, (b) Representação do módulo “*Light Assist*”.

Adaptado (“Active Scooters”, 2021).

O segundo módulo avaliado é conhecido como “*Todo Drive*” (Figura 2.54(c)). Os componentes são, as duas unidades de tração, o armazenador de energia, a fonte de potência, o dispositivo de controle e acessórios de conexão, todos representados na Figura 2.55.



Figura 2.54 – Representação do módulo “*Todo Drive*”. (a) Unidade de tração, (b) Unidade de controle, (c) Vista lateral do conjunto motorizado. Adaptado (“AC Mobility”, 2020).



Figura 2.55 – Representação dos componentes do módulo “*Todo Drive*”. (“AC Mobility”, 2020).

No acoplamento do módulo à cadeira de rodas é anexada uma unidade de tração de cada lado da cadeira, posicionada no lugar dos freios manuais (item 7 da Figura 2.3) e são conectados

por elementos parafusados no chassi. Os componentes principais, bem como o posicionamento e a montagem, estão ilustrados na Figura 2.56(a) e (b).

O modo de acoplamento da unidade de tração é realizado pelo acionamento da alavanca, enfatizada no balão de ampliação da imagem na Figura 2.50. Quando a alavanca está acionada e o conjunto fica motorizado e se a alavanca está no modo livre a cadeira de rodas fica manual, ainda que o módulo esteja anexado. Dessa forma a alavanca de acionamento funciona como embreagem e se o sistema estiver acoplado e o motor parado, o “*Todo Drive*” passa a funcionar como freio.

A Figura 2.54(b) representa o dispositivo de controle da cadeira de rodas, próximo ao braço, assim como o armazenador de energia posicionado sob o acento, ambos evidenciados pela cor opaca da figura.

O módulo apresenta grau integral de tração, e pode ser adquirido no mercado pelo valor aproximado de US\$ 3.500,00.

A configuração de cadeira de rodas, cuja potência é transferida à cadeira de rodas pelo contato ou por engrenamento da roda traseira, tem como exemplo a patente “*Power – Assisted wheelchair, Power unit for wheelchair, Control device*”, de Mizuno Masamitsu (2019). A Figura 2.50(a) e (b), destaca o módulo de MEA e a com a cor verde da figura indica a unidade de tração, cujo contato está na região posterior da cadeira de rodas.

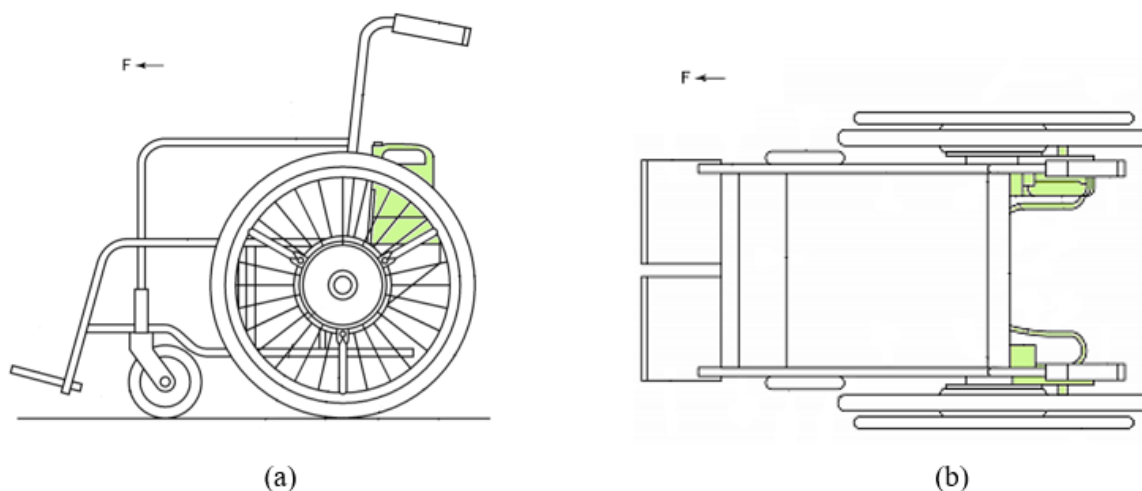


Figura 2.56 – Representação do módulo de motorização posicionada nas costas da cadeira de rodas (a) Vista lateral, (b) Vista Superior. Adaptado (Mizuno Masamitsu, 2019).

Dinâmica Veicular

O estudo da dinâmica veicular normalmente é subdividido em três modelos, longitudinal, lateral e vertical, para descrever a interação entre veículo e meio. Esse método facilita o entendimento dos efeitos relacionados a cada condição. Posteriormente o resultado poderá ser combinado para se obter uma condição global do sistema.

Leal, Rosa e Nicolazzi (2012) consideram fundamental a medida de potência para o veículo, essa que deverá ser a potência líquida fornecida por um motor em testes de dinamômetro. A potência fornecerá ao veículo condições de trabalho ideais para romper os esforços resistivos.

Esse estudo da dinâmica veicular é importante pois a análise dos esforços resistivos contribuirá para avaliação de cadeira de rodas, tanto para avaliar o esforço necessário empregado pelo usuário através dos braços, como no projeto e desenvolvimento de um sistema modular motorizado para auxílio de movimentação da cadeira de rodas.

2.3.7 Dinâmica longitudinal

A dinâmica longitudinal, estuda o comportamento do veículo, quanto ao mesmo movimento de translação, cujas forças envolvidas são: força longitudinal, resistência mecânica, resistência de aclave, resistência aerodinâmica e resistência ao rolamento

Neste trabalho a resistência aerodinâmica foi desprezada devido às baixas velocidades envolvidas para o deslocamento da cadeira de rodas, nas próximas subseções são introduzidas a resistência mecânica, a resistência de aclave e a resistência ao rolamento.

2.4.1.1 Resistência Mecânica

A resistência mecânica age sobre a potência transmitida por um veículo desde o motor (ou volante do motor), até o cubo das rodas motrizes. Apresentam diversas perdas, como atritos e inércias, em que parcelas de potência são perdidas nas transmissões, eixos, mancais dentre outros elementos de máquinas. A equação empírica descreve a relação entre a potência efetiva fornecida pelo motor e a potência entregue as rodas motrizes como pode-se observar na equação 01.

$$P_c = P_e \cdot \eta_m \quad (01)$$

Onde,

P_c – Potência no Cubo

P_e – Potência efetiva no motor

η_m – Rendimento mecânico da transmissão.

2.4.1.2 Resistência ao aclave

Quando o veículo está em condição de aclave, nem todo seu peso está sendo absorvido pelo solo sob a forma de força normal. A componente da força peso paralela ao piso é chamada de resistência ao aclave (Q_s), conforme ilustrada na Figura 2.57 e descrita pela equação 02.

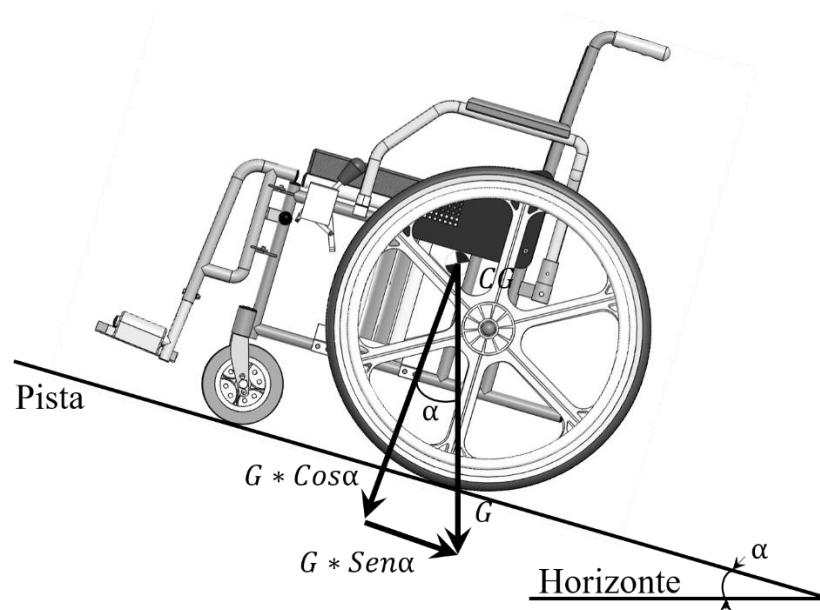


Figura 2.57 – Veículo na posição de aclave. (Adaptado, Rosa e Nicolazzi, 2012).

$$Q_s = G \cdot \text{sen}(\alpha) \quad (02)$$

Onde,

G – Peso do veículo [N]

α – Ângulo de inclinação da rampa [°]

2.4.1.3 Resistência Aerodinâmica

Segundo Leal, Rosa e Nicolazzi (2012), a resistência aerodinâmica é uma preocupação recorrente entre os projetistas. Essa resistência possui um efeito que influencia de maneira considerável o desempenho veicular, sendo responsável por consumir parte da potência fornecida ao veículo.

As resistências aerodinâmicas vêm da diferença de pressão entre a região frontal e traseira do veículo, vem do atrito pela passagem do ar pelo veículo e vem também pelo turbilhonamento pela passagem do ar pelo assoalho e motor. Todos os efeitos são complexos, no entanto são agregados por meio do coeficiente de arrasto, dessa forma a resistência aerodinâmica (Q_A) é representada pela equação 03.

$$Q_A = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot c_x \cdot v^2 \quad (03)$$

Onde,

ρ – Densidade do ar [kg/m^3]

v – Velocidade relativa do veículo [m/s]

A – Área frontal do veículo [m^2]

c_x – Coeficiente de arrasto

2.4.1.4 Resistência ao rolamento

Segundo Leal, Rosa e Nicolazzi (2012), as perdas devido a resistência ao rolamento são predominantemente devido ao par pneu pista, e são influenciadas por características como: velocidade, pressão de inflagem, carga radial, tipo de pneu, tipo de piso, temperatura, dentre outras com menor grau de influência. As características de resistência devido ao rolamento estão detalhadas no Apêndice A.

2.3.8 Dinâmica Lateral

Quando tem-se um veículo em deslocamento e no plano transversal do pneu estão aplicadas força vertical e força lateral. O ângulo formado pelo plano médio do pneu e a direção de deslocamento do pneu, é denominado ângulo de deriva (Leal; Rosa; Nicolazzi, 2012). A equação 04 apresenta a força lateral.

$$F_y = -C_\alpha \cdot \alpha \quad (04)$$

Onde,

C_α – Rigidez ao deslizamento da roda [N/rad]

α – Ângulo de deriva [$^\circ$]

Uma força lateral constante aplicada na roda, provoca uma deformação lateral no pneu, cujo desvio lateral, está representado pelas Figura 2.58a e Figura 2.58b, respectivamente em vista frontal e vista inferior.

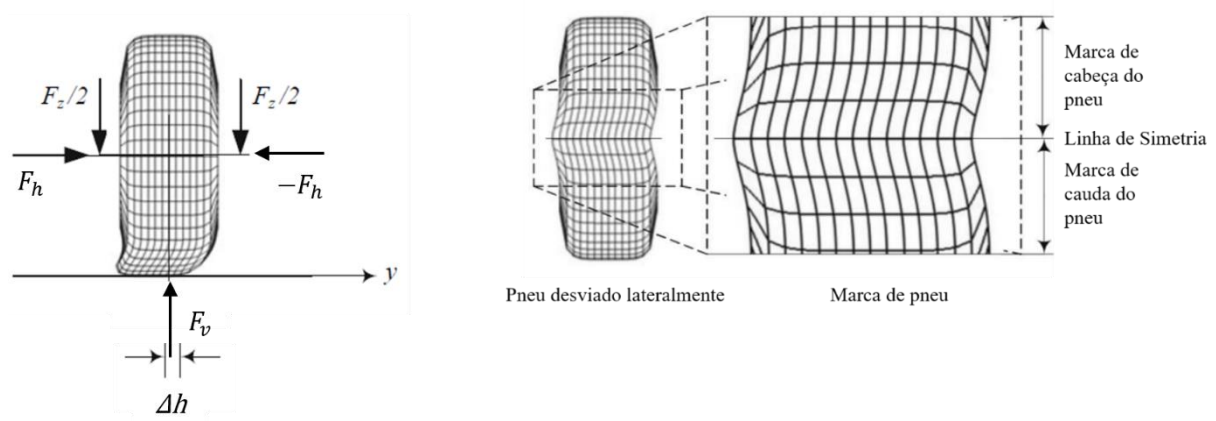


Figura 2.58 – Deformação do pneu sob força lateral constante, (a) Vista Frontal, (b) Vista Inferior. (Adaptado, Jazar, 2008).

Segundo Jazar (2008), o valor do ângulo de deriva sempre aumenta à medida que se aumenta a força lateral e vice-versa, quando as variáveis são alteradas pelo modo de condução do veículo.

A Figura 2.59, representa a força lateral em função do ângulo de deriva, desde que sejam valores pequenos, torna-se linear. No entanto essa proporção é reduzida para ângulos maiores

até que a força lateral se torna constante ou apresenta uma redução sensível quando o pneu desliza.

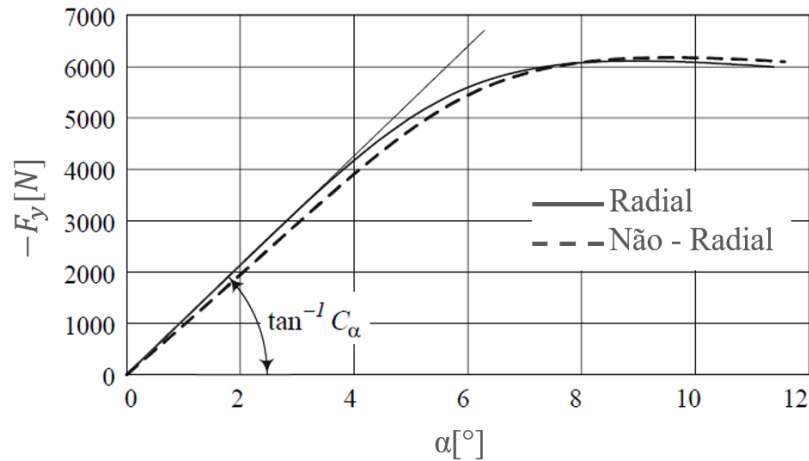


Figura 2.59 – Força Lateral (F_y) em função do ângulo de escorregamento (α) para a carga vertical constante. (Jazar, 2008).

2.4 Ergonomia e Antropometria

O estudo de ergonomia e antropometria são fundamentais para o projeto, o primeiro aplica-se a avaliar o uso de uma ferramenta pelo ser humano, e o segundo ao dimensionamento do corpo humano. Ambos podem ser utilizados como premissas de projeto para apresentar um modelo mais adequado à operação homem-máquina seja o usuário portador de necessidades especiais ou não (Panero e Zelnik, 2008).

A NBR 9050 (2015), determina as dimensões de referência para CRs manuais ou motorizadas sem reboque, que possibilitam a desmontagem para facilitação de transporte ou de armazenamento da mesma. Tais dimensões estão representadas na Figura 2.60. O módulo de referência para ocupação de uma pessoa em cadeira de rodas ocupa uma área de projeção no piso, com 0,80m de largura por 1,20m de comprimento.

Dimensões em metros

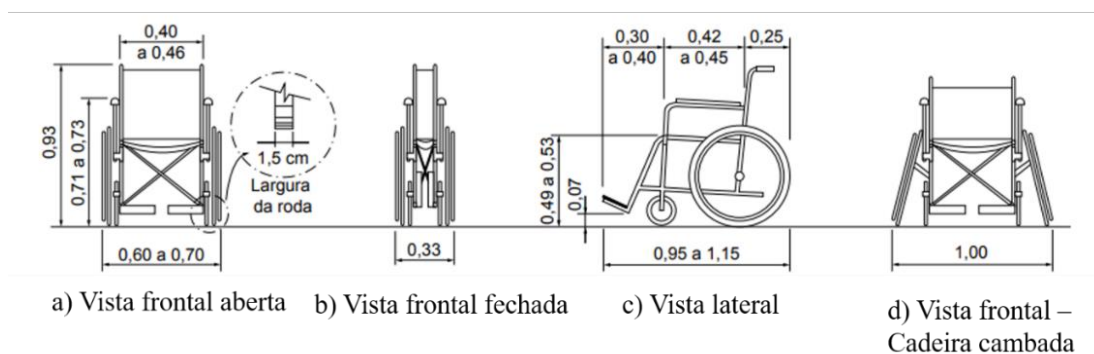


Figura 2.60 – Cadeira de rodas manual, motorizada e esportiva. (NBR 9050, 2015).

A Associação Brasileira de Normas técnicas prevê inclinações máximas para vias e para acesso a calçadas, caso o ângulo de inclinação seja superior a esses valores exige-se que sejam criados patamares de acomodação que varia de 0,45m a 0,60m ao longo de toda interseção do plano inclinado (Figura 2.61).

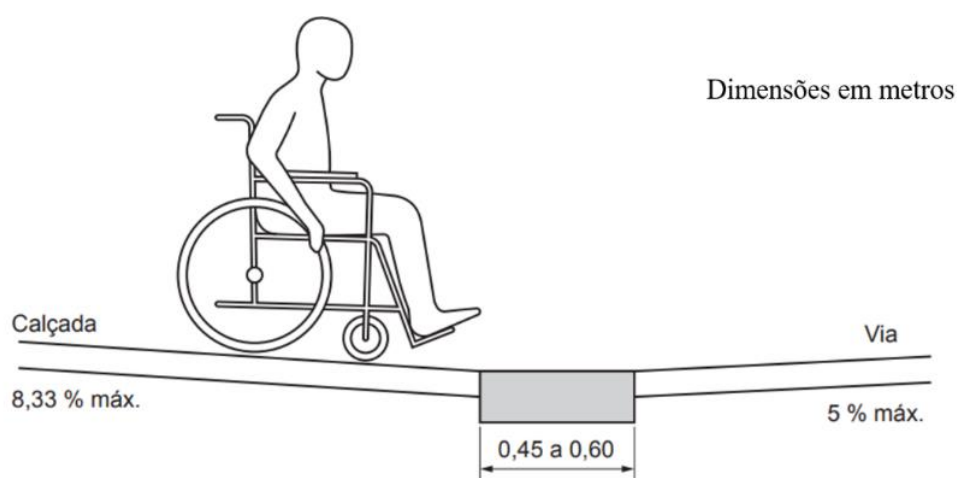


Figura 2.61 – Faixa de acomodação para travessia. (NBR 9050, 2015).

2.5 Pneus

Nesse capítulo serão apresentados alguns modelos de análise de pneus e de contato, podendo ser pela teoria de Coulomb, por modelos Semiempíricos, modelos empíricos ou mais especificamente pelas equações de Hans Bastiaan Pacejka e demais colaboradores como Bakker e Lindner.

2.5.1 Teoria de Coulomb

De acordo com o trabalho de Giesbers (2012), que realiza uma compilação dos fatores da teoria hertziana baseada em um conjunto de suposições, que são as seguintes:

- As superfícies de contato são imaginadas como perfeitamente lisas, dessa forma assume-se apenas uma pressão normal que atua entre as partes em contato.
- A adesão é negligenciada. Corpos em contato podem ser separados sem forças de adesão.
- O contato inicial é um ponto ou uma linha.
- A área de contato é muito menor que o raio característico do corpo.
- As pressões dentro dos materiais são pequenas promovendo apenas deformações elásticas.

2.5.2 Modelos Semiempíricos

Segundo Rill (2011), esse modelo é embasado no método de similaridade, por descrever o comportamento do pneu a partir de extrapolações e proporcionalidades a partir de dados obtidos experimentalmente.

Esse modelo combina um desempenho de tempo de execução de computador razoável com precisão de modelo suficiente. Os estudos sobre a modelagem de Pacejka foram pormenorizados no Apêndice A para os modelos de 1987 e 1989.

2.5.3 Equações de Pacejka

Dentre os modelos existentes para estudo do comportamento entre pneu e solo, as Equações de Pacejka é uma representação do Modelo Empírico que apresenta relevante importância aos estudos sobre as forças e momentos atuantes em condições contínuas, mesmo

o modelo não apresentando dependência direta com as propriedades entre pneu e as demais superfícies de contato. As Equações propostas por Pacejka inicialmente em 1987, e modificadas posteriormente nos anos de 1989, 1994, 2002, 2010, 2012 ficaram conhecidas como Fórmula Mágica (FM) (Pacejka, 2012).

2.5.4 Ângulo de Cambagem

O ângulo de cambagem é compreendido como o ângulo entre o plano de rodagem da roda e o plano perpendicular da superfície de rolamento. E se a inclinação tende ao afastamento da parte superior da roda com relação ao veículo, então o ângulo de cambagem é positivo, caso contrário o ângulo é negativo e se o ângulo é perpendicular então a cambagem é zero, Figura 2.63. (Silva, 2011).

A cambagem negativa, permite à cadeira de rodas maior estabilidade, em movimento. Uma aplicação característica de cambagem negativas para cadeira de rodas, Figura 2.62, se iniciou em 1980 quando os atletas paraolímpicos passaram a aplicar um ângulo de cambagem em torno de 9° , e posteriormente se verificou ângulos na faixa de 7° a 15° , na prática esses valores permaneçam geralmente entre 11° e 13° . Para cadeiras manuais de uso tradicional, o aumento desse ângulo não comprova resultados positivos para movimentos dos braços. (José, 2008).



Figura 2.62 – Ângulo de cambagem negativa (γ) em cadeira de rodas. (José, 2008).

Entretanto em automóveis, apresentam ângulos de cambagem que variam de 0° a 1° quando se encontram em posição estática, enquanto esse valor pode atingir limites que variam de $\pm 10^\circ$ em movimento. (Genta, 1997).

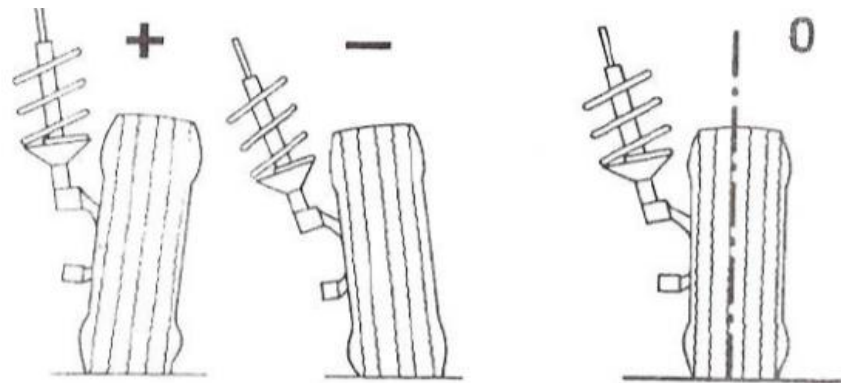


Figura 2.63 – Ângulo de Cambagem, (a) positivo, (b) negativo, (c) zero. (Esfahani et al., 2010).

3 METODOLOGIA DE PROJETO

Baseado na ampla pesquisa de similares realizada no capítulo 2 sobre diferentes configurações de módulos de motorização de cadeiras de rodas manuais, aplicou-se a metodologia de projeto para escolha e aprofundamento de uma arquitetura de motorização.

Adotou-se a metodologia de projeto proposta por Dedini (2022), amplamente aplicada nas últimas décadas em trabalhos diversos, inclusive nos temas relacionados a acessibilidade.

Segundo a proposta de Dedini (2022) a metodologia de projeto é compreendida por 3 fases, sendo a primeira o Estudo de Viabilidade, a segunda o Projeto Preliminar e a terceira o Projeto Detalhado. Dentro de cada fase estão presentes etapas que precisam ser desenvolvidas para que o resultado atenda às três regras básicas de um bom projeto, que são a simplicidade, segurança e inequivocidade.

No Estudo de Viabilidade, busca-se obter entre 3 e 6 propostas de soluções fisicamente realizáveis, depois de aplicadas as etapas do processo que são:

Identificação da necessidade, utilizando de informação de mercado para o atendimento da necessidade do cliente através do empenho de engenharia.

Análise Funcional, empregando o uso das Informações Tecnológicas, com foco no desdobramento da necessidade em funções e subfunções, buscando a simplificação e independência dos fatores.

Obtenção de soluções alternativas, que promova ampliação das propostas de solução, nessa etapa faz-se o uso de diversas ferramentas de criatividade, tanto pelo método intuitivo (Brainstorming, Método 6.3.5, Sinética, dentre outros), como pelo método discursivo (Quadro Morfológico, Analogia, Triz, Mapa conceitual etc.).

Viabilidade física, cuja experiência tecnológica fornece suporte para a organização da expansão de ideias de solução decorrente da etapa anterior.

Posteriormente a redução das propostas de solução através das restrições, nessa etapa o uso das *Design For Excellence* (DFXs) como fatores restritivos são empregadas para aquisição de um número de soluções filtradas, para tornar factível a avaliação. Dentre as DFXs existentes, tem-se alguns exemplos como: *Design for Manufacturing* (DFM), *Design for Assembly* (DFA), *Design for Manufacturing and Assembly* (DFMA), *Design for Environment* (DFEv), *Design for Value* (DFV), *Design for Modularity* (DFMo), *Design for Human Factors / Ergonomics* (DFHF/DFEr), dentre outras.

Para finalizar, aplica-se a verificação da viabilidade financeira, cuja etapa utiliza como critério de avaliação as fontes de investimento, com intuito selecionar as possíveis soluções fisicamente viáveis também em financeiramente possíveis.

O processo criativo e construtivo de um kit de motorização para uma cadeira de rodas manual, será baseado predominantemente na fase do Estudo de Viabilidade, cujo fluxograma geral, está representado na Figura 3.1.

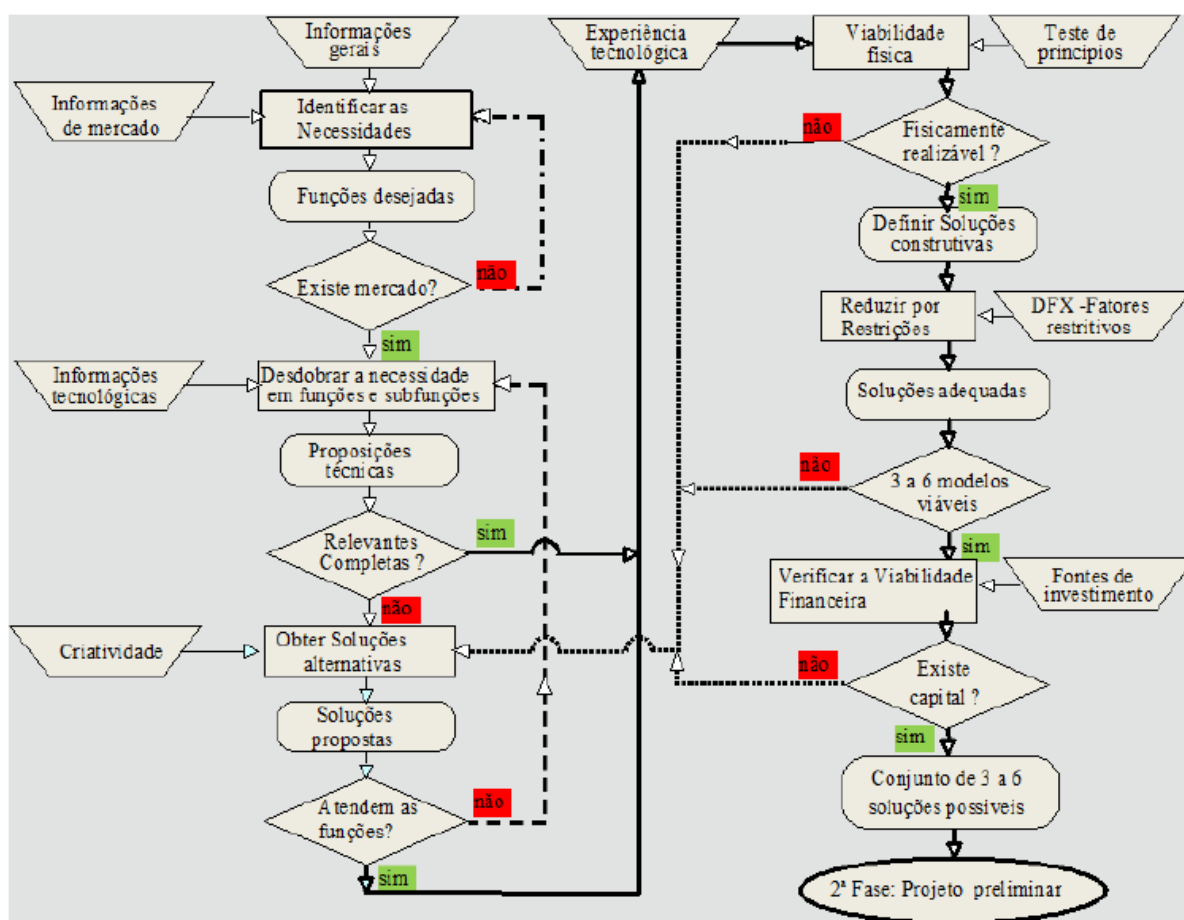


Figura 3.1 – Fluxograma do estudo de viabilidade geral. (Dedini, 2022).

Dentro do estudo de viabilidade, há alguns trabalhos que já foram desenvolvidos pelo grupo de pesquisa LabSIn, demonstrando com mais detalhamento a primeira etapa do estudo de viabilidade com foco na motorização de cadeira de rodas.

Alvarenga (2002), apresenta o desenvolvimento mais detalhado das primeiras etapas do estudo de viabilidade, apresentando a necessidade do cliente x requisitos de projeto, através da casa da qualidade, cuja representação esquemática está ilustrada na Figura 3.2, sendo esta a primeira matriz da Quality Function Deployment QFD.

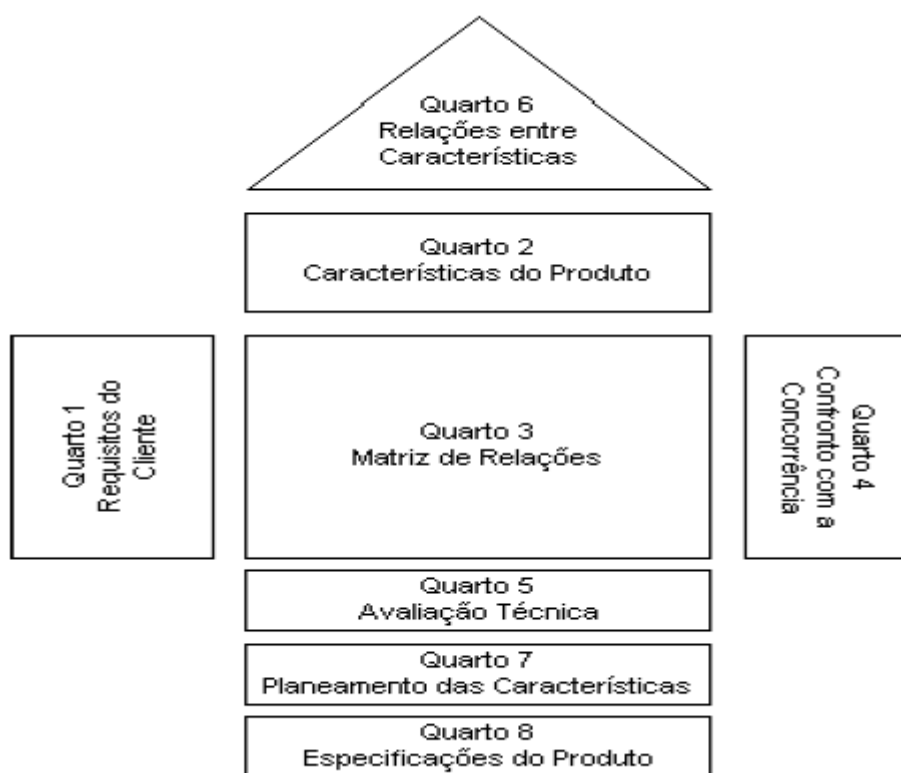


Figura 3.2 – Matriz QFD. (Delgado Neto, 2009).

No trabalho de Abreu (2010), sobre a aplicação da primeira etapa do estudo de viabilidade para sistema alternativo de motorização de cadeira de rodas, foi realizado um desenvolvimento detalhado dentro da primeira fase do estudo de viabilidade com relação a Casa da Qualidade dentro do QFD. Foram aplicados questionários para obtenção de Necessidades do Cliente, que foram utilizadas pelo grupo de engenheiros do LabSIn para obtenção de itens dos requisitos de projeto para a posterior correlação de avaliação.

Sequencialmente, a Fase do Projeto Preliminar que recebe os resultados oriundos da primeira fase da metodologia, tem como objetivo estabelecer qual das alternativas propostas no estudo de viabilidade apresenta melhor desempenho após o processo de otimização dos parâmetros submetidos dentro das etapas dessa fase (Dedini, 2022).

Durante essa fase, o objetivo é otimizar o projeto com maior potencial de solução e ao final dessa etapa espera-se o projeto melhorado para encaminhamento para próxima fase.

O Projeto Detalhado, recebe o resultado da fase anterior, para estabelecimento dos parâmetros de engenharia que torna propícia e detalhado de forma clara para uma solução factível de produção. Nessa fase são previstos todos os desenhos detalhados, com as respectivas

tolerâncias, além das respectivas indicações de materiais e processos de produção (Dedini, 2022).

Segundo Alvarenga (2006), durante o desenvolvimento da proposta de solução, uma das abordagens é o entendimento do projetista quanto ao projeto que está sendo desenvolvido. Por exemplo, quando se desenvolvem produtos para pessoas cegas, é conveniente que as pessoas envolvidas no processo usem em algum momento vendas nos olhos, ou o uso de tampões nos ouvidos quando o projeto é desenvolvido para pessoas com deficiência auditiva, promovendo uma percepção mais próxima do usuário coberto pela solução.

No desenvolvimento de um módulo de propulsão para cadeira de rodas, utilizar por algumas vezes uma cadeira de rodas para transpor alguns obstáculos ou realizar manobras triviais que uma pessoa com cadeira de rodas fica submetida, contribui para avaliar a restrição e características intrínsecas do uso da cadeira de rodas, o que propicia ao projetista maior sensibilidade e potencial de ideias para propor soluções que incluem o kit de motorização.

Outro estudo realizado pelo grupo de pesquisa do LabSIn, foi através do trabalho de Lombardi Junior (2002), que demonstra a aplicação da acessibilidade para crianças que utilizam a cadeira de rodas. Esse estudo demonstra a necessidade de maior flexibilidade da proposta de solução, uma vez que as crianças apresentam normalmente maior ritmo de crescimento e com diferentes capacidades de esforço bilateral para propulsão da cadeira de rodas. A implementação de um sistema de motorização contribui para a maior integração social, uma vez que elas podem ficar frustradas por ter que pedir auxílio, isso gera uma dependência e atrapalha o desenvolvimento social e pessoal.

De acordo com Rodrigues (2022), no desenvolvimento e construção de uma cadeira de rodas para banho, a metodologia de projeto aplicada, demonstra uma característica que ganhou espaço no desenvolvimento de produto, que é a utilização de recurso e técnicas não tradicionais de fabricação dentro do desenvolvimento de projeto. O uso da manufatura aditiva, e outros métodos de fabricação digital que potencializam estratégias de produção, que se tornam mais acessíveis e economicamente favorável, comparado com os métodos tradicionais de fabricação.

Nesse trabalho, busca-se a aplicação da metodologia de projeto, para propor soluções atendam o público alvo de menor poder de compra. Considerando a análise de média dos custos de produtos segundo a avaliação das tipologias no capítulo 2, que foi resumida na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Tabela valores comparativos aproximados para alguns modelos comerciais de diferentes tipologias.

Tabela de valores médios de motorização de cadeira de rodas segundo a tipologia		
Tipologia de motorização	Produto comercial	Valor aproximado
Reboque Traseiro (RT)	SMOOV	US\$ 5.600,00
	Smart Drive MX2	US\$ 6.800,00
Reboque Dianteiro (RD)	Firefly	US\$ 3.000,00
	UnaWheel mini	US\$ 5.000,00
Reboque Central (RC)	Power Pack (Solo, DUO, DUO HD, Plus)	US\$ 1.300,00
	ZX-1	US\$ 8.500,00
Motorização do cubo da roda traseira (MCT)	E-Motion 25	US\$ 13.000,00
	Alber e-fix35 (36)	US\$ 4.800,00
Motorização por engrenamento ou por atrito (MEA)	Max-e	US\$ 5.800,00
	Light Drive	US\$ 11.500,00
	Todo Drive	US\$ 3.500,00

Baseado na expectativa de valores praticados no mercado, busca-se uma proposta de solução cujo público a ser atendido possa adquirir um sistema de propulsão com valor que não ultrapasse o valor de produção maior que US\$ 500,00.

4 MODELO PROPOSTO DE MOTORIZAÇÃO DE CADEIRA DE RODAS

Segundo a metodologia de projeto apresentada no capítulo anterior, este trabalho adota o estudo de viabilidade como foco de desenvolvimento e detalha algumas etapas principais que precisam ser desenvolvidas e solucionadas para melhor desempenho dos passos seguintes. Essas etapas são: Identificar as necessidades, Desdobrar a necessidade em funções e subfunções, Obter soluções alternativas, Viabilidade física, Reduzir por restrições e Verificar a viabilidade Financeira.

A primeira etapa do fluxograma do estudo de viabilidade é compreendida pela identificação das necessidades do consumidor. Nessa etapa foi encontrada na própria literatura trabalhos com ampla abordagem, que sustenta as características da necessidade do consumidor, como exemplo os trabalhos anteriores pelo grupo de pesquisa do Laboratório de Sistemas Integrados da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) através dos trabalhos de Alvarenga (2002), Silva (2011), Silva (2009), Lombardi Junior (2002) e Abreu (2010).

A necessidade do usuário de cadeira de rodas, que busca por um sistema assistivo, está em poder contar com um sistema auxiliar de propulsão com controle estável de movimento, que permita conforto e confiabilidade durante a operação. Dessa forma, buscam-se funções que descrevam a melhor maneira de reprocessar os parâmetros de projeto, para permitir que as funções deixem de ser definidas em estados mais gerais e complexos para condições mais simplificadas.

Na segunda etapa do estudo de viabilidade, faz-se necessário o uso da ferramenta que promove o desdobramento de funções desde o estado mais geral e complexo, para uma condição mais simples, consequentemente esse recurso potencializa a promoção de soluções inventivas. Com isso, nessa etapa do estudo de viabilidade o diagrama funcional fornece indicações de ligação física entre os elementos e funções desdobradas para etapas seguintes de criatividade que será melhor detalhada ao decorrer dessa seção.

A condição mais geral e complexa, cuja denominação do desenvolvimento da solução é dada por “Promover movimentação ordenada da cadeira de rodas”. A partir da função global, foi aplicado o desdobramento funcional para obter as subfunções simples e explícitas.

A Figura 4.1 representa o resultado do desdobramento funcional em sua condição mais explícita de funções e de subfunções, sendo as funções ou parâmetros mais desdobrados como

fatores ou ideias para alimentação da primeira coluna do quadro morfológico da próxima etapa do estudo de viabilidade.

No desdobramento fez-se necessário a identificação das entradas e saídas da fronteira do sistema analisado, tendo como objetos de entrada e saída de Material, Energia e Informação. Vale ressaltar que tanto o material de entrada, como o de saída foram subdivididos em relativo à cadeira de rodas e motorização e relativo ao pavimento onde a cadeira de rodas e a motorização apresentam interação através de contato, os demais objetos de analisados foram estudados em conjunto na análise funcional.

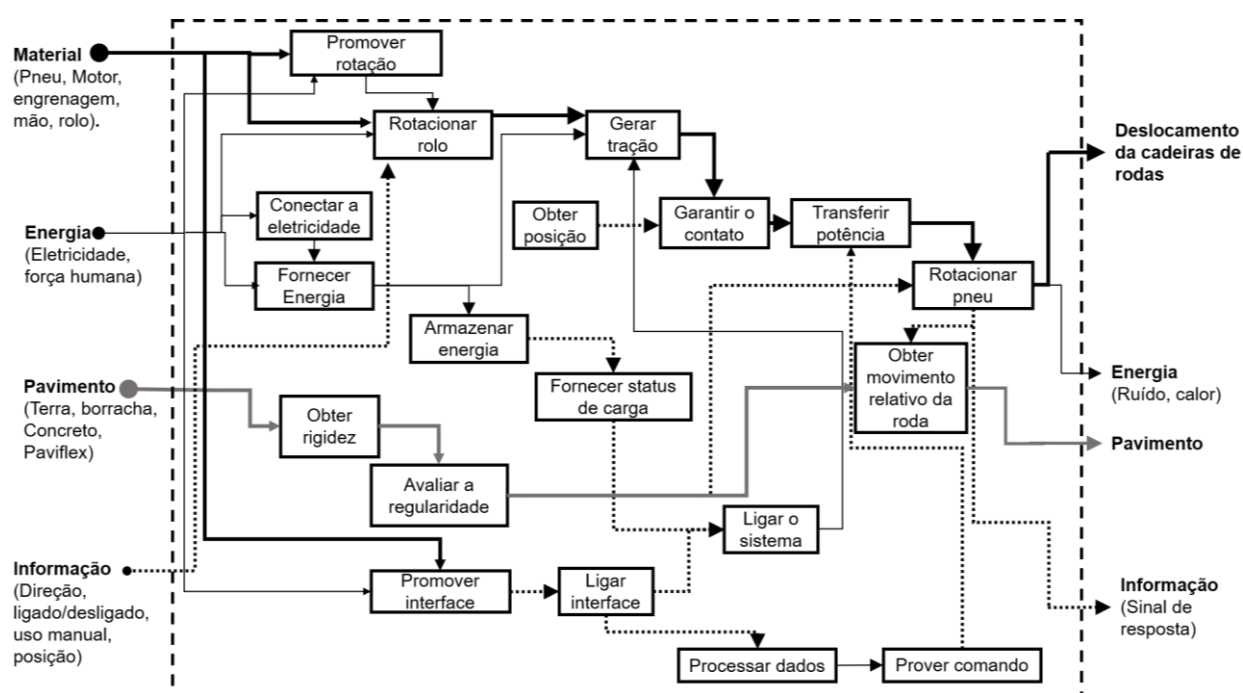


Figura 4.1 – Diagrama Funcional da Cadeira de rodas motorizada

Na terceira etapa, conhecida como Método da Criatividade, o Brainstorming foi utilizado para complementar as propostas de solução do Quadro Morfológico. Ambos foram combinados para potencializar as propostas de solução do módulo de propulsão de uma cadeira de rodas manual, essas ferramentas foram utilizadas em comutação com o diagrama funcional cuja associação promove maior robustez do desenvolvimento da solução.

A Figura 4.2a, apresenta o quadro morfológico parâmetro/funcional generalizado de motorização de cadeira de rodas, enquanto que a Figura 4.2b, apresenta a calibração do quadro morfológico, que é um mapeamento de soluções já existentes no mercado, que estão contempladas no quadro morfológico.

Quadro morfológico proposta de transmissão de potência na cadeira de rodas.							
Parâmetro/ Funcional	Soluções Parciais - Conhecidas ou Possíveis						
Tipologia de tração do módulo	Reboque Traseiro	Reboque Dianteiro	Reboque Central	Motorização do Rodízio	Motorização do Cubo da Roda	Motorização por Engrenamento na Roda	Motorização por Atrito no Pneu
Tipo de Acoplamento do módulo à CRs	Fixo	Presilhas	Engate rápido	Parafusos	Guias	Pino	
Tipos de Motores	Corrente Contínua	De Indução	Síncrono de Ímã Permanente	Relutância Chaveado	Com Escovas	Sem Escovas	
Conexão do Motor/Transmissão	Eixo rígido	Eixo flexível	Acionamento Bendix	Embreagem	Embreagem Centrífuga	Conversor de torque	
Transmissão	Planetário	Corrente, Coroa e Pinhão	Par Engrenado	Diferencial	Correia e Polia	Eixo sem fim	Transmissão direta do eixo motor
Tipo de Contato	Atrito simples	Atrito Duplo (Paralelo)	Atrito Duplo (Cônico)	Roda motriz do módulo	Contato lateral por "ranhuras"	Engrenamento externo	Engrenamento interno
Tipo de pneu da cadeira de rodas	Pneu Maciço – Liso	Pneu Maciço – Cravos	Pneu com câmara de ar - Liso	Pneu com câmara de ar – Cravos	Pneu sem câmara de ar – Liso	Pneu sem câmara de ar – Cravos	Roda motriz do módulo
Armazenadores	Baterias Chumbo	Baterias de Lítio	Ultra capacitores				
Fontes de Energia	Rede elétrica	Painel Fotovoltaico	Células Combustível				
Interface do usuário com o sistema de motorização	Guidão do módulo	Joystick	Controle Remoto	Comando de Voz	Assistido pelo aro de propulsão	Controle Facial	EMG

(a)

Quadro morfológico proposta de transmissão de potência na cadeira de rodas.							
Parâmetro/ Funcional	Soluções Parciais - Conhecidas ou Possíveis						
Tipologia de tração do módulo	Reboque Traseiro	Reboque Dianteiro	Reboque Central	Motorização do Rodízio	Motorização do Cubo da Roda	Motorização por Engrenamento na Roda	Motorização por Atrito no Pneu
Tipo de Acoplamento do módulo à CRs	Fixo	Presilhas	Engate rápido	Parafusos	Guias	Pino	Viga central
Tipos de Motores	Corrente Contínua	De Indução	Síncrono de Ímã Permanente	Relutância Chaveado	Com Escovas	Sem Escovas	
Conexão do Motor/Transmissão	Eixo rígido	Eixo flexível	Acionamento Bendix	Embreagem	Embreagem Centrífuga	Conversor de torque	
Transmissão	Planetário	Corrente, Coroa e Pinhão	Par Engrenado	Diferencial	Correia e Polia	Eixo sem fim	Transmissão direta do eixo motor
Tipo de Contato	Atrito simples	Atrito Duplo (Paralelo)	Atrito Duplo (Cônico)	Roda motriz do módulo	Contato lateral por "ranhuras"	Engrenamento externo	Engrenamento interno
Tipo de pneu da cadeira de rodas	Pneu Maciço – Liso	Pneu Maciço – Cravos	Pneu com câmara de ar - Liso	Pneu com câmara de ar – Cravos	Pneu sem câmara de ar – Liso	Pneu sem câmara de ar – Cravos	Roda motriz do módulo
Armazenadores	Baterias Chumbo	Baterias de Lítio	Ultra capacitores				
Fontes de Energia	Rede elétrica	Painel Fotovoltaico	Células Combustível				
Interface do usuário com o sistema de motorização	Guidão do módulo	Joystick	Controle Remoto	Comando de Voz	Assistido pelo aro de propulsão	Controle Facial	EMG

(b)

Figura 4.2 – Quadro Morfológico da cadeira de rodas motorizada (a) Geral (b) Calibração do QM.

A Figura 4.3, apresenta o Quadro Morfológico específico para a tipologia de motorização traseira, suspensa na cadeira de rodas.

Quadro morfológico, proposta de transmissão de potência com módulo traseiro suspenso na cadeira de rodas.							
Parâmetros / Funcional	Soluções Parciais - Conhecidas ou Possíveis						
Promover sustentação de contato do Rolo ao Pneu	Por Cabos de Aço	Braço de alavanca	Fuso acionado por motor elétrico	Molas de tração	Molas torcionais	Cilindro Pneumático	
Propiciar fixação do módulo a cadeira de rodas	Fixo	Presilhas	Engate rápido	Parafusos e porca	Guias com pino de travamento		
Gerar propulsão	Motor BLDC - Axial	Motor BLDC - Lateral	Motor DC - Axial	Motor DC - Lateral	Motor de Passo	Motor AC	
Perfil de Contato do Rolo	Paralelo - Unilateral	Paralelo - Bilateral	Radial - Plano	Cônico - Plano	Cônico - Concavo	Cônico - Convexo	Por engrenamento
Tipo de pneu da cadeira de rodas	Pneu Maciço - Liso	Pneu Maciço - Cravos	Pneu Pneumático - Liso	Pneu Pneumático - Cravos			
Promover controle do sistema operação	Controle remoto	Comando de Voz	Joystick	Assistido pelo aro de propulsão	Controle Facial	EMG	
Promover acionamento do mecanismo de motorização	Alavanca manual ação do usuário	Alavanca manual ação de terceiro	Botão de acionamento elétrico	Válvula de acionamento direcional			

Figura 4.3 – Quadro Morfológico da cadeira de rodas motorizada

As propostas de soluções geradas pelo Quadro morfológico, apresentam um número relativamente grande de soluções, devido as combinações entre os elementos, que nesse caso corresponde a 120.960 soluções fisicamente construtivas.

No entanto, sabe-se que dentre essas soluções algumas delas não são adequadas, com isso, o estudo de viabilidade propõe a calibração e a filtragem do quadro morfológico para 4 soluções de modelos viáveis.

Para estudar as soluções, produziu-se um quadro morfológico digital, disponível no endereço: <https://sites.google.com/dac.unicamp.br/qmcrrs-aquilachagas/in%C3%ADcio>. Nessa plataforma online está representada a visualização dinâmica do quadro morfológico, sob a forma de modelos 3D das propostas de soluções que compõe o quadro morfológico, conforme o fragmento apresentado na Figura 4.4. Dessa forma o leitor pode interagir facilmente com a representação, colocando-a em uma perspectiva que melhor atenda a necessidade de compreensão sobre cada uma das propostas de soluções do quadro morfológico funcional.

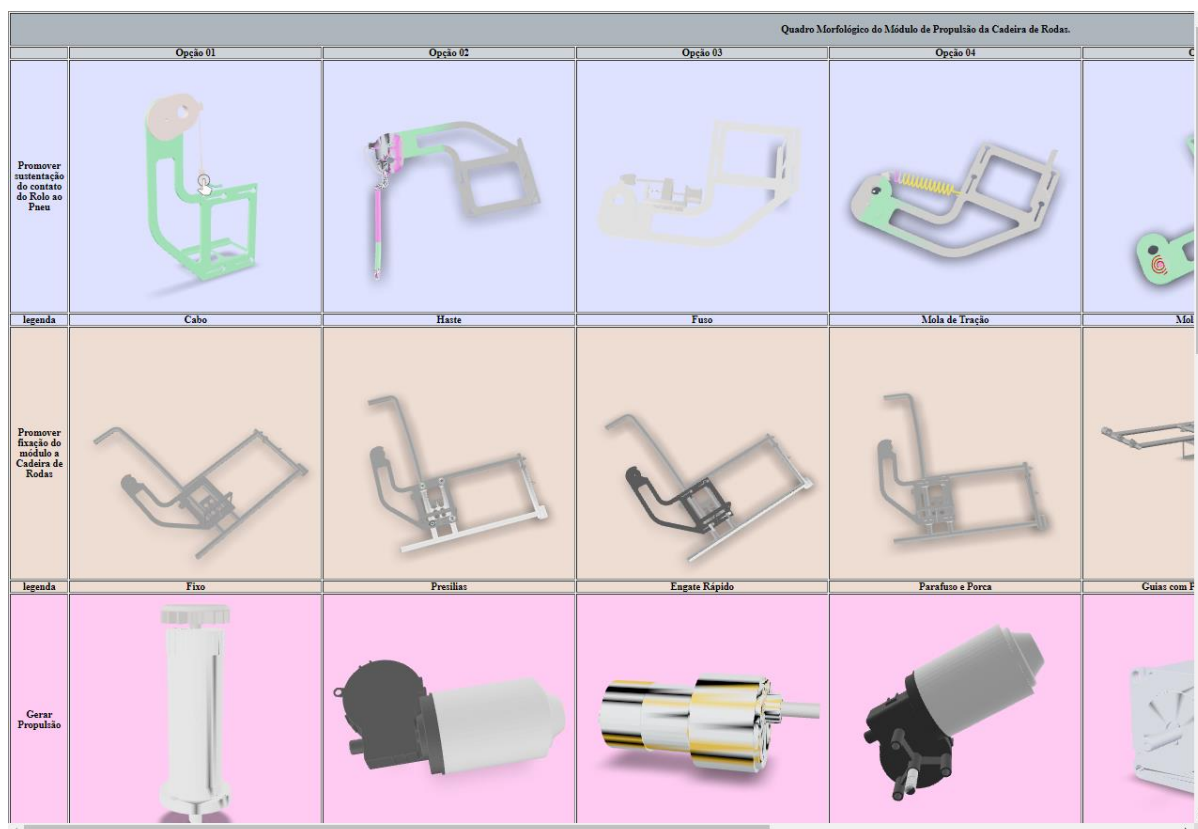


Figura 4.4 – Fragmento do quadro morfológico da cadeira de rodas motorizada em visualização 3D interativa em plataforma on-line.

As propostas apresentadas no quadro morfológico têm como objetivo atender à necessidade do usuário quanto ao desempenho adequado do módulo de propulsão nos diversos ambientes de trabalho. Por exemplo, em ambientes internos, normalmente é exigido melhor manobrabilidade e maior capacidade de acelerações, já nos ambientes externos pode ser exigido do módulo de propulsão maior desempenho de potência, quando a cadeira de rodas fica submetida planos inclinados mais acentuados. De qualquer maneira, independente do ambiente de trabalho que estará submetido o kit de motorização, espera-se autonomia de percurso adequado a pequenas e médias distâncias.

A quarta etapa do estudo de viabilidade, compreende em realizar uma filtragem das diversas soluções encontradas até o momento, para isso propõe-se uma análise a partir do *Design For Excellence*, para a realização do processo de calibração e de filtragem do quadro morfológico.

Para satisfazer o segundo objetivo específico, propõe-se a filtragem do quadro morfológico, fez-se necessário utilizar 4 funções pertinentes a aplicação do módulo propulsor

para cadeira de rodas, sendo elas: *Design for Assembly* (DFA), *Design for Disassembly* (DFD), *Design for Human Factors/Ergonomics* (DFHF/DFE) e *Design for Accessibility* (DFAc).

A escolha das DFXs, DFA e DFD apresentaram objetivos de avaliação que se demonstraram adequados para a escolha na filtragem do quadro morfológico, pois apresentam objetivos preponderantes para a construção das partes em ambiente virtual. O uso de peças padronizadas que estão facilmente disponíveis no mercado, como os dispositivos de fixação, motores, parafusos e armazenadores de energia. Outra característica das DFXs em consideração foi o projeto de peças que sejam a prova de erros, que no caso do kit de motorização o fato das peças serem espelhas contribui para minimizar o erro. O kit de motorização é projetado para a fixação rápida e eficiente, através da utilização de dispositivos de engate rápido, conforme ilustrado pela Figura 4.9. A escolha das duas DFX, leva em consideração a necessidade da redução de tempo de montagem para o uso e de desmontagem, tanto para o transporte quanto para armazenamento.

A escolha da DFX DFHF/DFE, apresenta-se como critério de escolha em razão imprescindível do usuário requerer menor auxílio para conversão do sistema manual em motorizado, tanto no acoplamento instantâneo, que compreende a motorização em operação do kit de motorização já acoplado à cadeira de rodas ou como na anexação do módulo de propulsão à cadeira de rodas e seus devidos dispositivos de travamento.

A seleção da DFAc, como última ferramenta de seleção para filtragem do quadro morfológico, vem com o objetivo de proporcionar uma opção adequada para atender os usuários com diferentes necessidades, considerando o nível de restrição de movimento, esforço ou controle da cadeira de rodas tornando necessárias soluções de característica simples, intuitivas e de baixo esforço físico de operação.

O uso das ferramentas de filtragem de forma simultânea, tem como premissa atender a um maior grupo de mercado, que representa uma vasta repercussão de retorno no número de compradores, gerando lucratividade e fidelização do mercado consumidor com um produto inclusivo, gerador de satisfação em benefício da sociedade. (Dedini, 2022).

A Figura 4.5 apresenta a filtragem do quadro morfológico segundo as DFXs listadas anteriormente. Dessa forma, o critério de seleção para as soluções viáveis foi por meio da experiência do grupo de pesquisa do LabSIn, obtendo 4 soluções viáveis.

Quadro morfológico, proposta de transmissão de potência com módulo traseiro suspenso na cadeira de rodas.									
Parâmetros / Funcional	Soluções Parciais - Conhecidas ou Possíveis								
Promover sustentação de contato do Rolo ao Pneu	Por Cabos	Por Braço de alavanca	Fuso acionado por motor de passo	Mola de tração	Mola de torcional	Cilindro Pneumático			
	DFA DFD DFHF/EI DFAc	DFA DFD DFHF/EI DFAc	DFA DFD DFHF/EI DFAc	DFA DFD DFHF/EI DFAc	DFA DFD DFHF/EI DFAc	DFA DFD DFHF/EI DFAc			
Propiciar fixação do módulo a cadeira de rodas	Fixo	Presilhas	Engate rápido	Parafusos e porca	Guias com pino de travamento				
	DFA DFD DFHF/EI DFAc	DFA DFD DFHF/EI DFAc	DFA DFD DFHF/EI DFAc	DFA DFD DFHF/EI DFAc	DFA DFD DFHF/EI DFAc				
Gerar propulsão	Motor BLDC - Axial	Motor BLDC - Lateral	Motor DC - Axial	Motor DC - Lateral	Motor de Passo	Motor AC - Axial	Motor AC - Lateral		
	DFA DFD DFHF/EI DFAc	DFA DFD DFHF/EI DFAc	DFA DFD DFHF/EI DFAc	DFA DFD DFHF/EI DFAc	DFA DFD DFHF/EI DFAc	DFA DFD DFHF/EI DFAc	DFA DFD DFHF/EI DFAc		
Perfil de Contato do Rolo	Paralelo - Unilateral	Paralelo - Bilateral	Radial - Plano	Cônico - Plano	Cônico - Concavo	Cônico - Convexo	Por engrenamento		
	DFA DFD DFHF/EI DFAc	DFA DFD DFHF/EI DFAc	DFA DFD DFHF/EI DFAc	DFA DFD DFHF/EI DFAc	DFA DFD DFHF/EI DFAc	DFA DFD DFHF/EI DFAc	DFA DFD DFHF/EI DFAc		
Tipo de pneu da cadeira de rodas	Pneu Maciço - Liso	Pneu Maciço - Cravos	Pneu Pneumático - Liso	Pneu Pneumático - Cravos					
	DFA DFD DFHF/EI DFAc	DFA DFD DFHF/EI DFAc	DFA DFD DFHF/EI DFAc	DFA DFD DFHF/EI DFAc					
Promover controle do sistema operação	Controle remoto	Comando de Voz	Joystick	Assistido pelo aro de propulsão	Controle Facial	EMG			
	DFA DFD DFHF/EI DFAc	DFA DFD DFHF/EI DFAc	DFA DFD DFHF/EI DFAc	DFA DFD DFHF/EI DFAc	DFA DFD DFHF/EI DFAc	DFA DFD DFHF/EI DFAc			
Promover acionamento do mecanismo de motorização	Alavanca manual ação do usuário	Alavanca manual ação de terceiro	Botão de acionamento elétrico	Válvula de acionamento direcional					
	DFA DFD DFHF/EI DFAc	DFA DFD DFHF/EI DFAc	DFA DFD DFHF/EI DFAc	DFA DFD DFHF/EI DFAc					

Figura 4.5 – Filtragem do Quadro Morfológico da cadeira de rodas motorizada

Na Figura 4.6, está representado o Quadro morfológico e as respectivas combinações de soluções de modelos fisicamente viáveis, que estão virtualmente representados pelas Figuras 4.7 à 4.9.

Quadro morfológico, proposta de transmissão de potência com módulo traseiro suspenso na cadeira de rodas.									
Parâmetros / Funcional	Soluções Parciais - Conhecidas ou Possíveis								
Promover sustentação de contato do Rolo ao Pneu	Por Cabos	Por Braço de alavanca	Fuso acionado por motor de passo	Mola de tração	Mola de torcional	Cilindro Pneumático			
	DFA DFD DFHF/EI DFAc	DFA DFD DFHF/EI DFAc	DFA DFD DFHF/EI DFAc	DFA DFD DFHF/EI DFAc	DFA DFD DFHF/EI DFAc	DFA DFD DFHF/EI DFAc			
Propiciar fixação do módulo a cadeira de rodas	Fixo	Presilhas	Engate rápido	Parafusos e porca	Guias com pino de travamento				
	DFA DFD DFHF/EI DFAc	DFA DFD DFHF/EI DFAc	DFA DFD DFHF/EI DFAc	DFA DFD DFHF/EI DFAc	DFA DFD DFHF/EI DFAc				
Gerar propulsão	Motor BLDC - Axial	Motor BLDC - Lateral	Motor DC - Axial	Motor DC - Lateral	Motor de Passo	Motor AC - Axial	Motor AC - Lateral		
	DFA DFD DFHF/EI DFAc	DFA DFD DFHF/EI DFAc	DFA DFD DFHF/EI DFAc	DFA DFD DFHF/EI DFAc	DFA DFD DFHF/EI DFAc	DFA DFD DFHF/EI DFAc	DFA DFD DFHF/EI DFAc		
Perfil de Contato do Rolo	Paralelo - Unilateral	Paralelo - Bilateral	Radial - Plano	Cônico - Plano	Cônico - Concavo	Cônico - Convexo	Por engrenamento		
	DFA DFD DFHF/EI DFAc	DFA DFD DFHF/EI DFAc	DFA DFD DFHF/EI DFAc	DFA DFD DFHF/EI DFAc	DFA DFD DFHF/EI DFAc	DFA DFD DFHF/EI DFAc	DFA DFD DFHF/EI DFAc		
Tipo de pneu da cadeira de rodas	Pneu Maciço - Liso	Pneu Maciço - Cravos	Pneu Pneumático - Liso	Pneu Pneumático - Cravos					
	DFA DFD DFHF/EI DFAc	DFA DFD DFHF/EI DFAc	DFA DFD DFHF/EI DFAc	DFA DFD DFHF/EI DFAc					
Promover controle do sistema operação	Controle remoto	Comando de Voz	Joystick	Assistido pelo aro de propulsão	Controle Facial	EMG			
	DFA DFD DFHF/EI DFAc	DFA DFD DFHF/EI DFAc	DFA DFD DFHF/EI DFAc	DFA DFD DFHF/EI DFAc	DFA DFD DFHF/EI DFAc	DFA DFD DFHF/EI DFAc			
Promover acionamento do mecanismo de motorização	Alavanca manual ação do usuário	Alavanca manual ação de terceiro	Botão de acionamento elétrico	Válvula de acionamento direcional					
	DFA DFD DFHF/EI DFAc	DFA DFD DFHF/EI DFAc	DFA DFD DFHF/EI DFAc	DFA DFD DFHF/EI DFAc					

Propostas de Soluções:

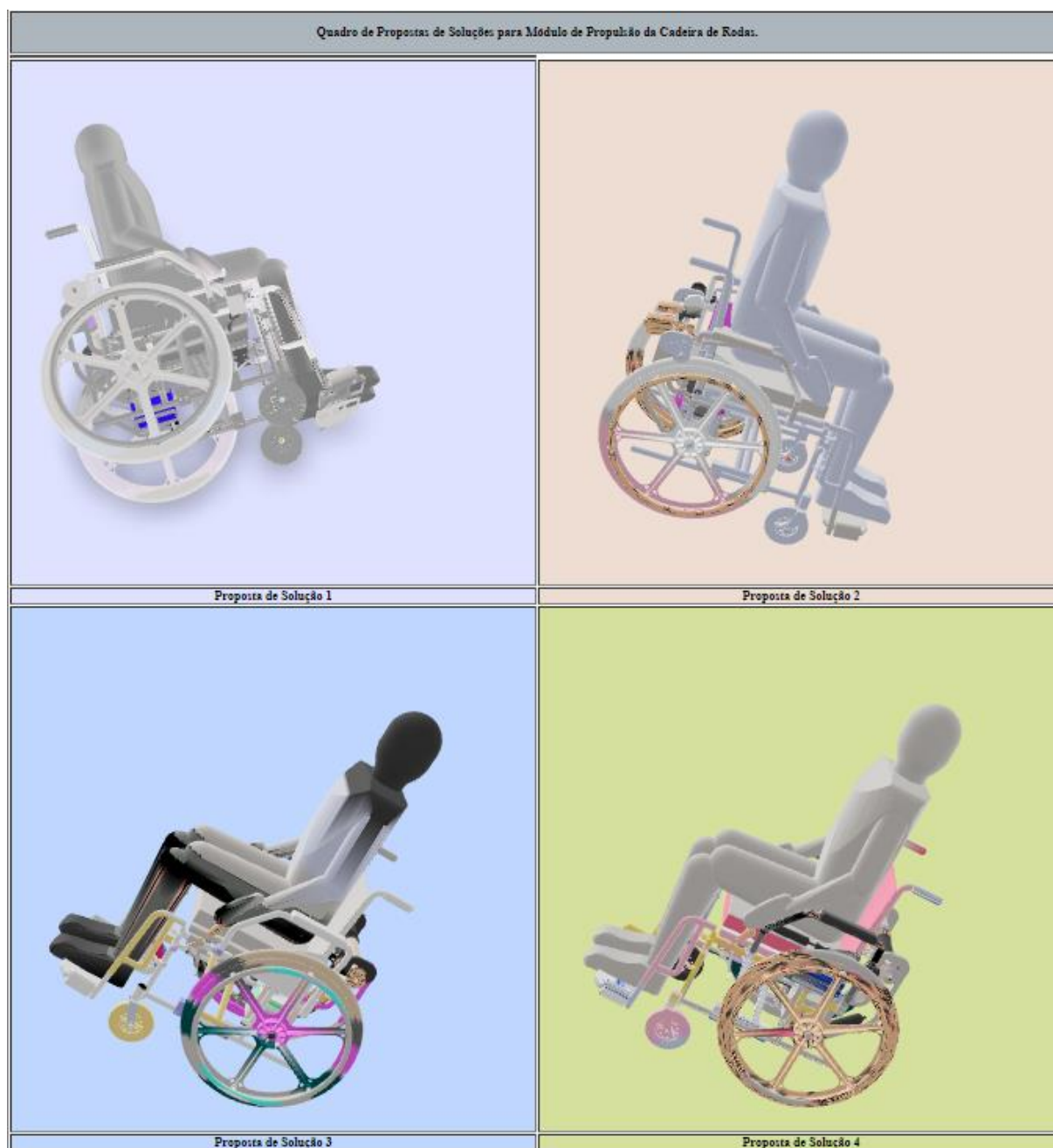
- 1ª Solução: Azul
- 2ª Solução: Verde
- 3ª Solução: Lilás
- 4ª Solução: Vermelho

Figura 4.6 – Seleção das soluções fisicamente viáveis da filtragem do Quadro Morfológico da cadeira de rodas motorizada

A partir dos modelos propostos para um kit de motorização para cadeira de rodas manual na filtragem do quadro morfológico, obtém-se soluções que apresentam características de montagem, que se baseiam no acoplamento físico do dispositivo ao chassi da cadeira de rodas, cujo conjunto é posicionado na região centro-traseira da cadeira de rodas.

A transmissão de potência entre o módulo de propulsão e as rodas traseiras da cadeira de rodas será através do contato do rolo propulsor e o pneu da cadeira de rodas.

As representações virtuais dinâmicas das propostas de soluções podem ser vistas através do endereço: <https://sites.google.com/dac.unicamp.br/qmcrs-aquilachagas/in%C3%ADcio>.



A 1ª proposta de solução está representada pela Figura 4.7, em uma construção virtual do conjunto. É possível observar no modelo os pontos de fixação abaixo do assento, acoplados nas estruturas laterais do chassi da cadeira de rodas, sendo nesse caso os dispositivos de bloqueio por engate rápido, que permitem a regulação para diferentes posições a depender do modelo da cadeira de rodas manual, conforme a representação ampliada dessa seção na Figura 4.9.

Esse conjunto permite que o usuário alterne entre três posições de operação. O primeiro modo é para o acionamento de motorização do sistema, o segundo modo de operação é para o acionamento dos freios de repouso e o último modo de operação permitir o uso manual da cadeira de rodas, mesmo com o conjunto anexado a cadeira. A representação do dispositivo está indicada pela Figura 4.10(a) e (b).

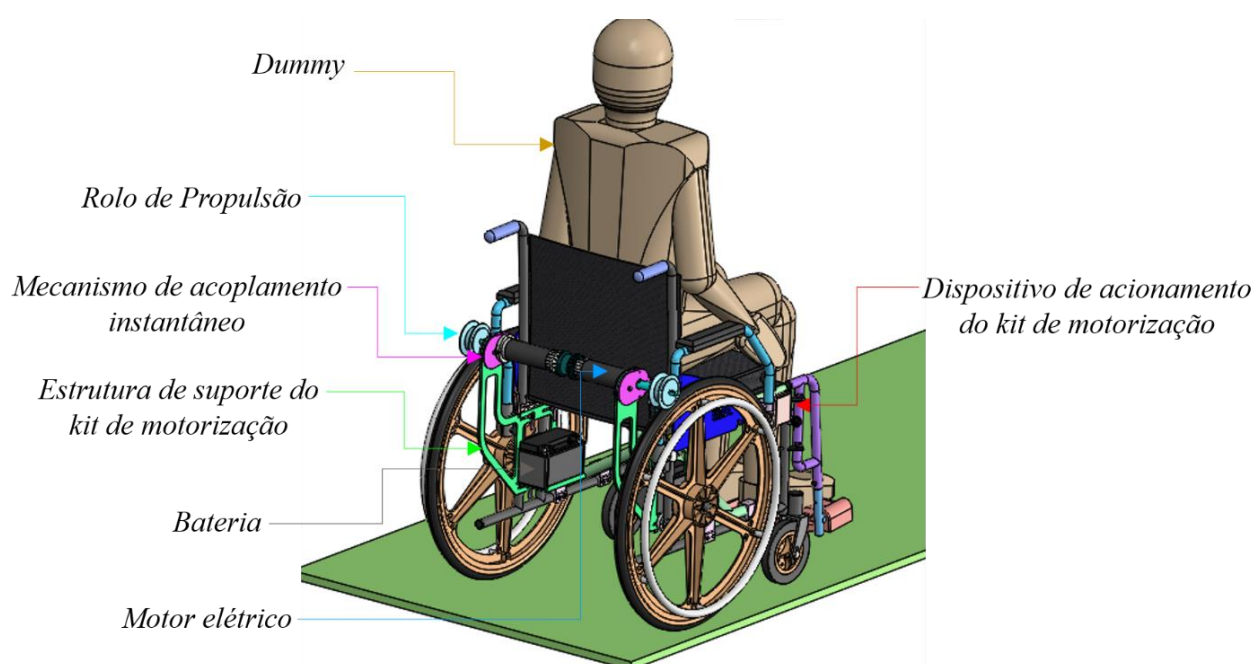


Figura 4.7 – 1ª Proposta de Solução do kit de motorização para uma cadeira de rodas manual em perspectiva posterior.

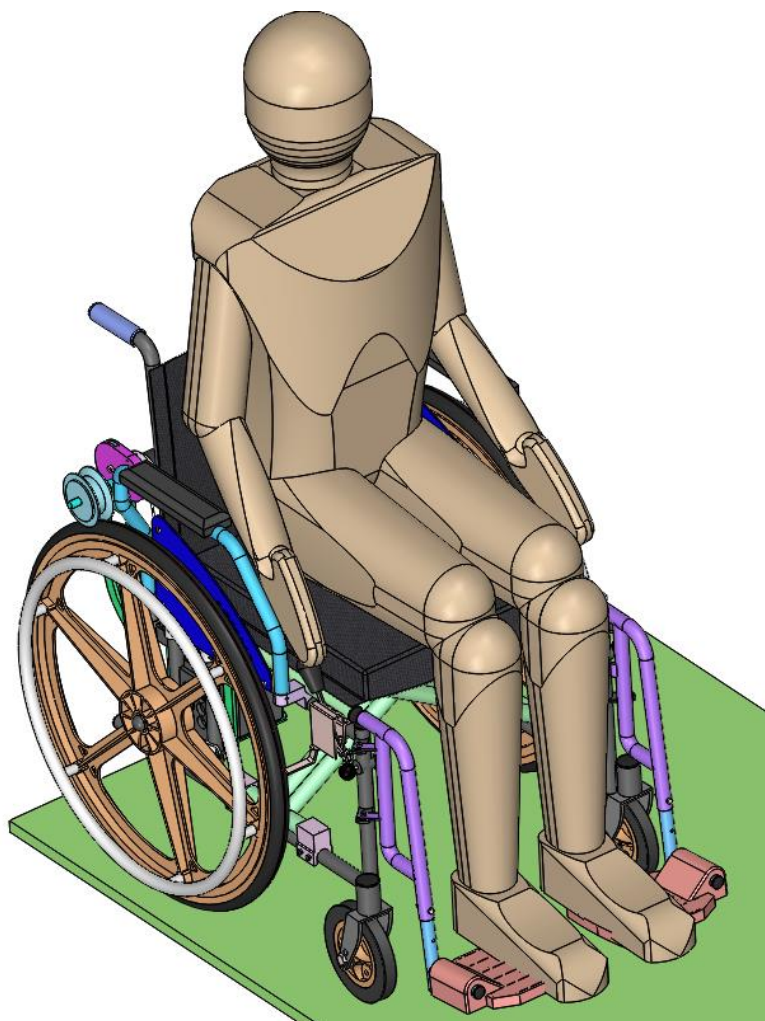


Figura 4.8 – 1ª Proposta de Solução do kit de motorização para uma cadeira de rodas manual em perspectiva anterior.

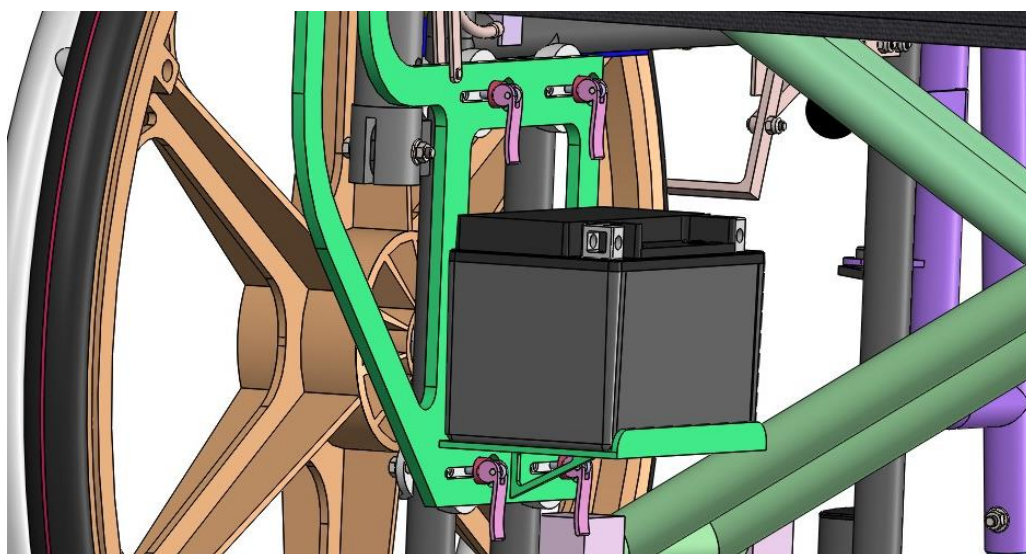


Figura 4.9 – Representação dos pontos de ancoragem do módulo ao chassi da cadeira de rodas da 1ª Proposta de Solução do kit de motorização para uma cadeira de rodas manual.

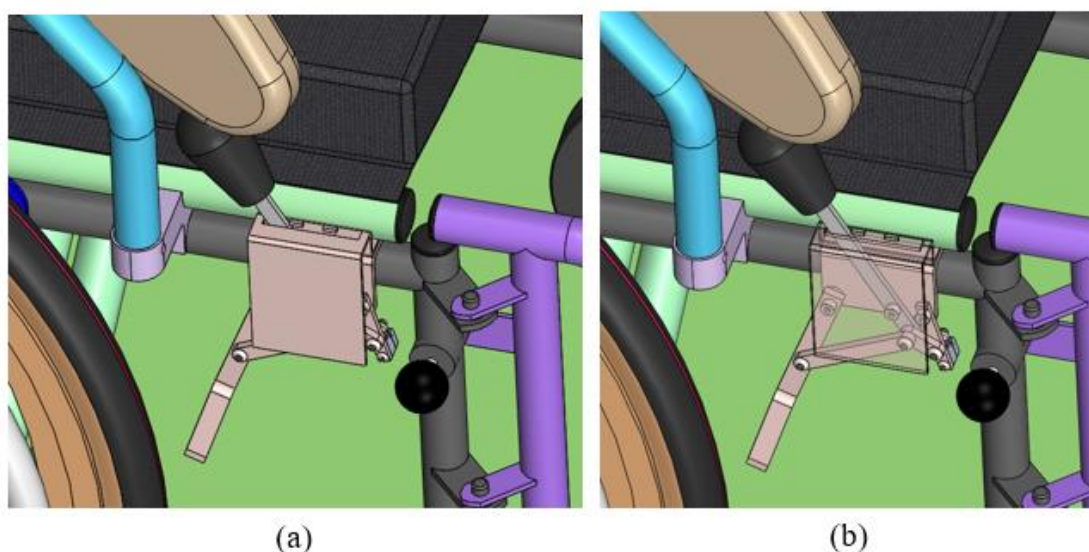


Figura 4.10 – Representação do dispositivo de acionamento do módulo de propulsão e dos freios de repouso da 1ª proposta de solução do kit de motorização. (a) Capa de proteção opaca (b) Capa de proteção transparente.

A 2ª proposta de solução, permite que a configuração de acionamento do dispositivo de acoplamento do rolo de propulsão ao pneu traseiro da cadeira de rodas seja feita por uma haste de extensão (ou braço do dispositivo).

Esse componente apresenta uma haste com prolongamento até a frente da cadeira de rodas, onde o usuário, aciona um botão mecânico na sua extremidade, que permite a liberação do giro da alavanca para compressão do rolo sobre o pneu quando for acionado, ou a mesma liberação para retirar o contato entre o rolo e o pneu quando a alavanca for levantada. Esse sistema está representado pela Figura 4.11.

Essa proposta, apresenta desvantagem no sentido da mobilidade do usuário na região do acento, uma vez que o conjunto de alavancas bilaterais ocupa espaço de acomodação, podendo gerar um possível desconforto.

Essa proposta de solução requer do usuário maior grau de esforço físico, bem como de controle motor dos membros superiores para manipulação dos dispositivos de travamento (Figura 4.12) e do deslocamento de giro do braço para a posição acoplada ou desacoplada, na conversão da cadeira de rodas.

A representação virtual da 2ª proposta de solução pode ser vista no endereço: <https://sites.google.com/dac.unicamp.br/qmcrrs-aquilachagas/in%C3%ADcio>.

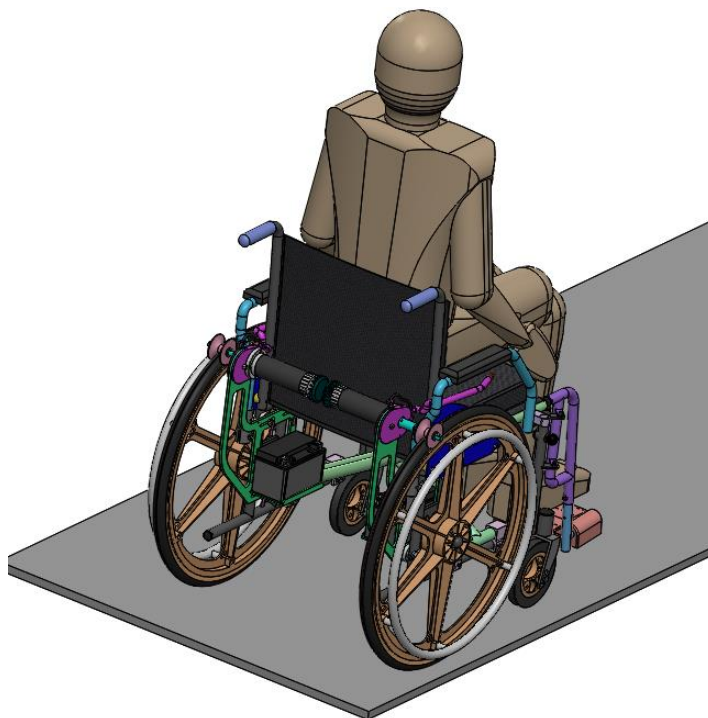


Figura 4.11 – 2ª Proposta de Solução do kit de motorização para uma cadeira de rodas manual.

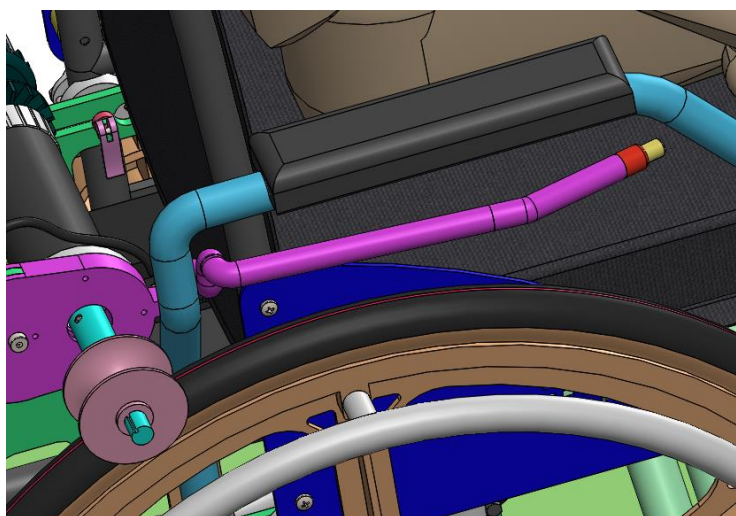


Figura 4.12 – Vista em perspectiva do dispositivo de acionamento da 2ª Proposta de Solução do kit de motorização para uma cadeira de rodas manual.

A 3ª proposta de solução, representada pela Figura 4.13, compõe um sistema com o acoplamento do rolo de propulsão ao pneu da roda traseira semelhante a 1ª proposta de solução, entretanto o dispositivo de acionamento é feito por motor elétrico em um sistema de fuso e guia linear.

Quanto aos dispositivos de anexação do kit ao chassi da cadeira de rodas, existem guias de deslizamento (Figura 4.14) que promove o deslocamento mais suave e com menor esforço do usuário durante o acoplamento e o desacoplamento do módulo às CRs, no entanto o conjunto total desta solução incrementa massa ao sistema.

A representação virtual da 3ª proposta de solução pode ser vista no endereço: <https://sites.google.com/dac.unicamp.br/qmcrcs-aquilachagas/in%C3%ADcio>.

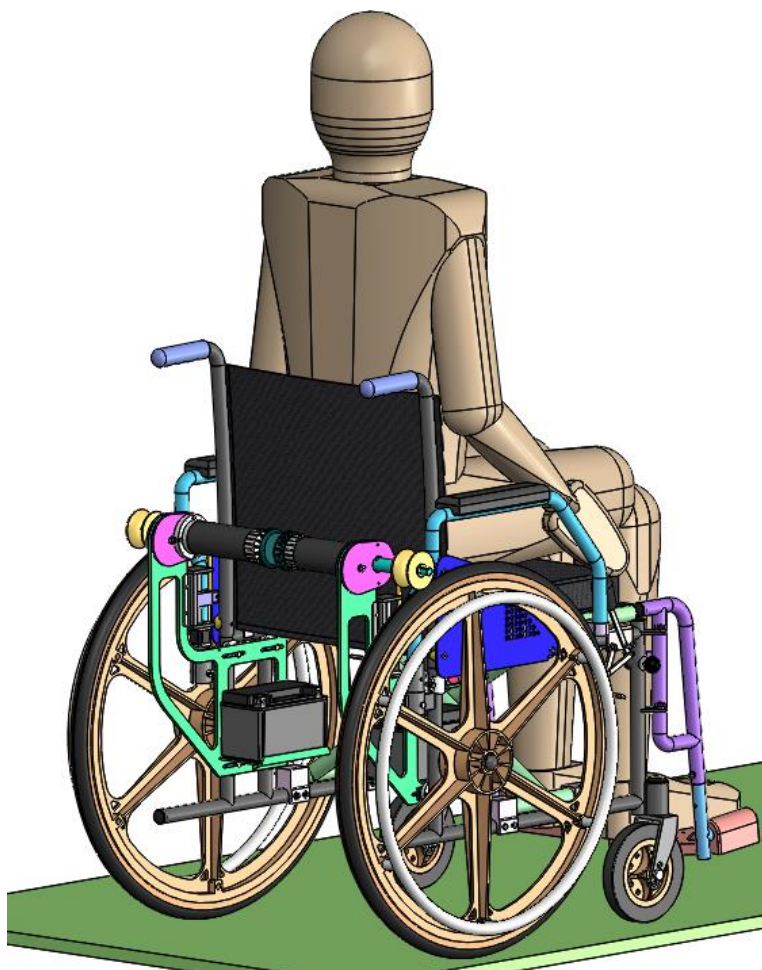


Figura 4.13 – 3ª Proposta de Solução do kit de motorização para uma cadeira de rodas manual.

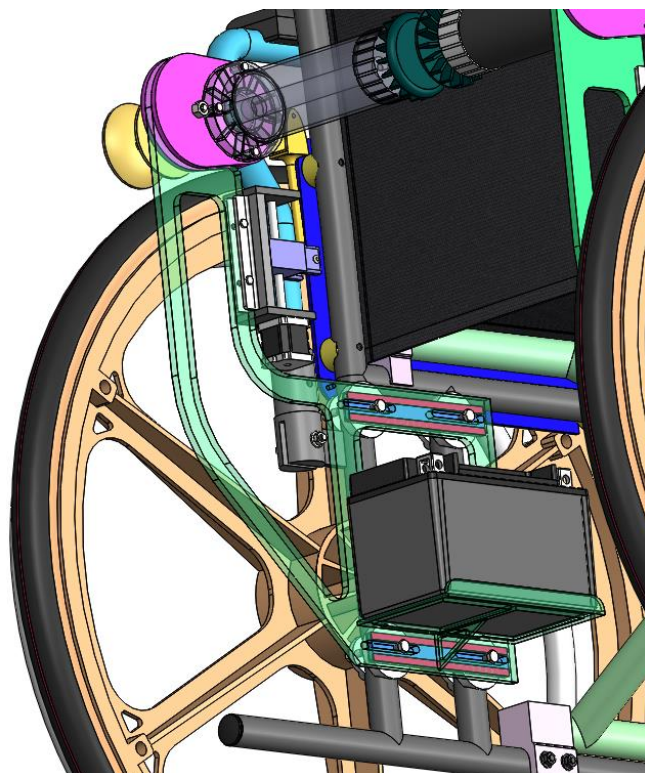


Figura 4.14 – Ampliação da região do kit de motorização da 3ª Proposta de Solução.

A 4ª proposta de solução (Figura 4.15), apresenta configuração de acoplamento de motorização composto por um cilindro pneumático de acionamento simples com retorno de mola. O sistema de anexação do kit à CRs, é por engate rápido como ilustra a Figura 4.16.

A representação virtual da 4ª proposta de solução pode ser vista no endereço: <https://sites.google.com/dac.unicamp.br/qmcrcs-aquilachagas/in%C3%ADcio>.

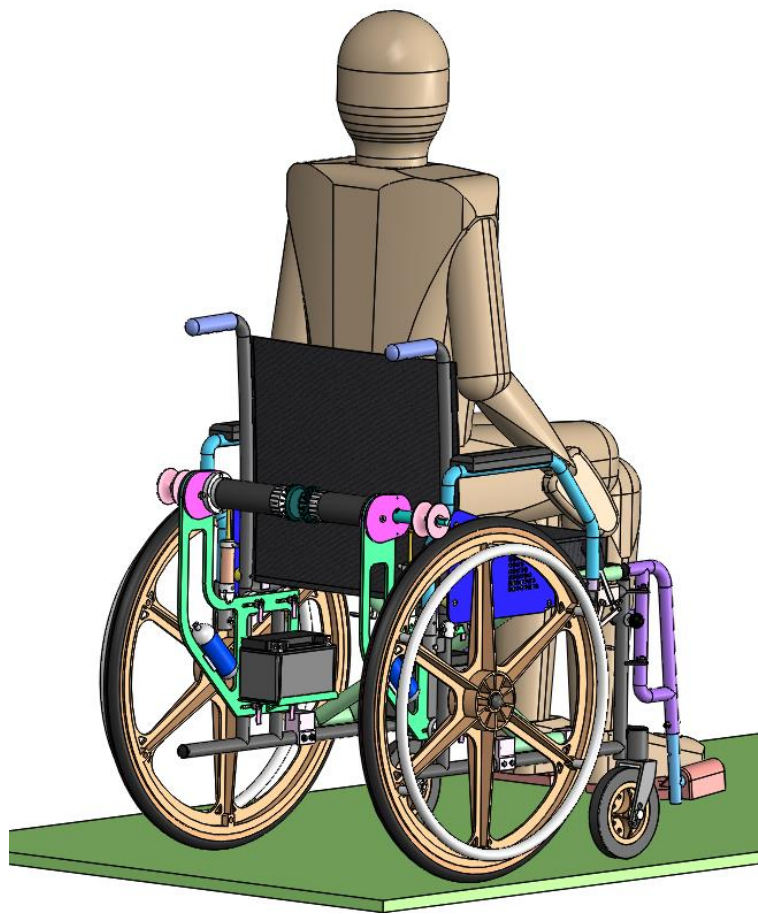


Figura 4.15 – 4ª Proposta de Solução do kit de motorização para uma cadeira de rodas manual.

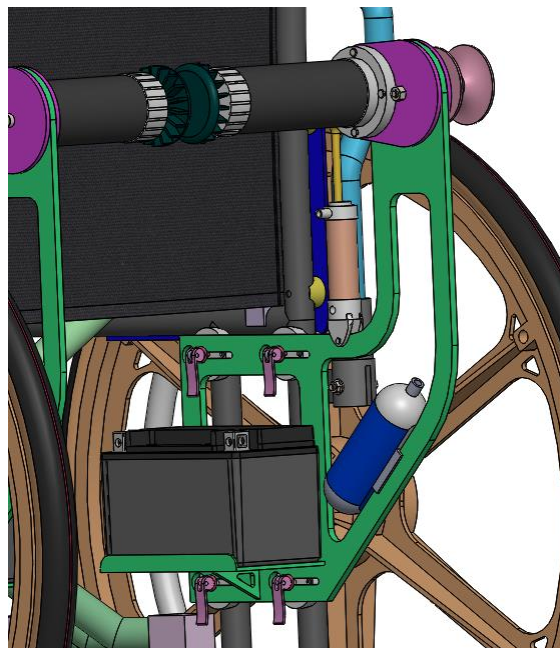


Figura 4.16 – Ampliação da região do kit de motorização da 4ª Proposta de Solução.

Foram obtidas quatro propostas de soluções fisicamente realizáveis. Dessa forma, uma próxima etapa da metodologia seria a verificação da viabilidade financeira, como próximo passo para a metodologia de projeto. No entanto esse trabalho busca o aprofundamento da análise dos parâmetros de projeto para a consolidação da solução.

Com isso, a 1ª proposta de solução será objeto de análise cinemática e dinâmica, pois a partir das ferramentas aplicadas, essa foi a proposta com maior potencial para aprofundamento do estudo.

Assim, uma modelagem co-simulada da interação do sistema de potência para propulsão da cadeira de rodas com o sistema físico, que compreende a sustentação do módulo à cadeira de rodas manual, será desenvolvida no capítulo seguinte.

5 PROTÓTIPO VIRTUAL E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Neste capítulo, será apresentada a modelagem detalhada da proposta de solução que foi escolhida na seção anterior, bem como o procedimento de co-simulação do modelo, que demonstrará os efeitos do módulo de propulsão acoplado a cadeira de rodas manual.

5.1 Descrição do protótipo

Para descrever o modelo do kit de propulsão desenvolvido, faz-se necessário apresentar o modelo da cadeira de rodas manual utilizada como suporte do módulo para estudo deste trabalho.

A cadeira de rodas manual do tipo dobrável em “X”, da fabricante Ortopedia Jaguaribe, modelo Jaguaribe FIT (Figura 5.1), cujas principais especificações da cadeira de rodas e as dimensões antropométricas, estão apresentadas na Figura 5.2.



Figura 5.1 – Cadeira de rodas manual dobrável em X, modelo Jaguaribe FIT. (Jaguaribe, 2022)

Dimensões válidas para cadeira de rodas Jaguaribe FIT (cm)

							
42	40	23	36-42	50	45	2	100kg

(a)

				
6"	24"	88	36	100

(b)

Figura 5.2 – Principais especificações da cadeira de rodas manual Jaguaribe Fit. Adaptado (Jaguaribe, 2022).

Para a anexação do módulo à cadeira de rodas, faz-se necessário o ajuste de 4 pares de dispositivos de engate rápido na seção abaixo do assento (Figura 5.3).

Vale ressaltar que as abraçadeiras fixas no chassi, poderão ficar de modo permanente, mesmo sem o kit acoplado à CRs.

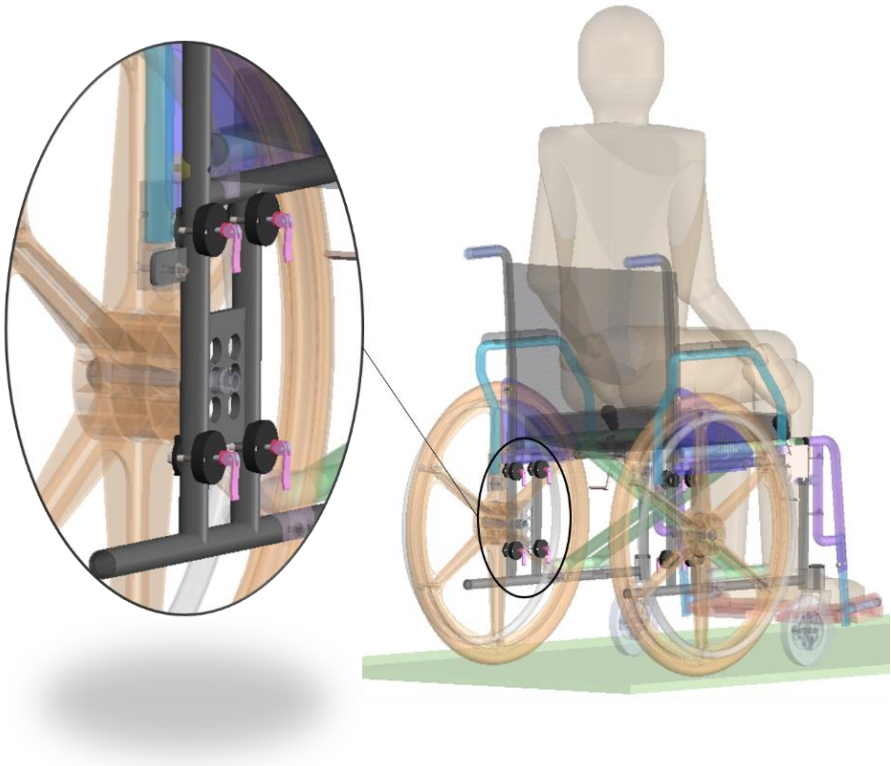


Figura 5.3 – Conjunto de dispositivos permanentes para acoplamento ao chassi da cadeira de rodas.

O mecanismo que é acoplado a parte anterior do chassi da cadeira de rodas, e que são posicionados bilateralmente, sendo responsável pelas três condições de operação, representada pela Figura 5.4, são:

A primeira posição, a alavanca fica para frente, e é responsável por acionar o freio manual de repouso.

A segunda posição, a alavanca fica ao centro, e é responsável por colocar a cadeira no modo manual, cuja propulsão é feita pelos braços do usuário ou por auxílio de outra pessoa empurrando ou puxando a cadeira pelos punhos.

E por último, a alavanca posicionada para trás, faz com que a o rolo seja posicionado sobre o pneu, fornecendo a condição de operação do módulo de propulsão.

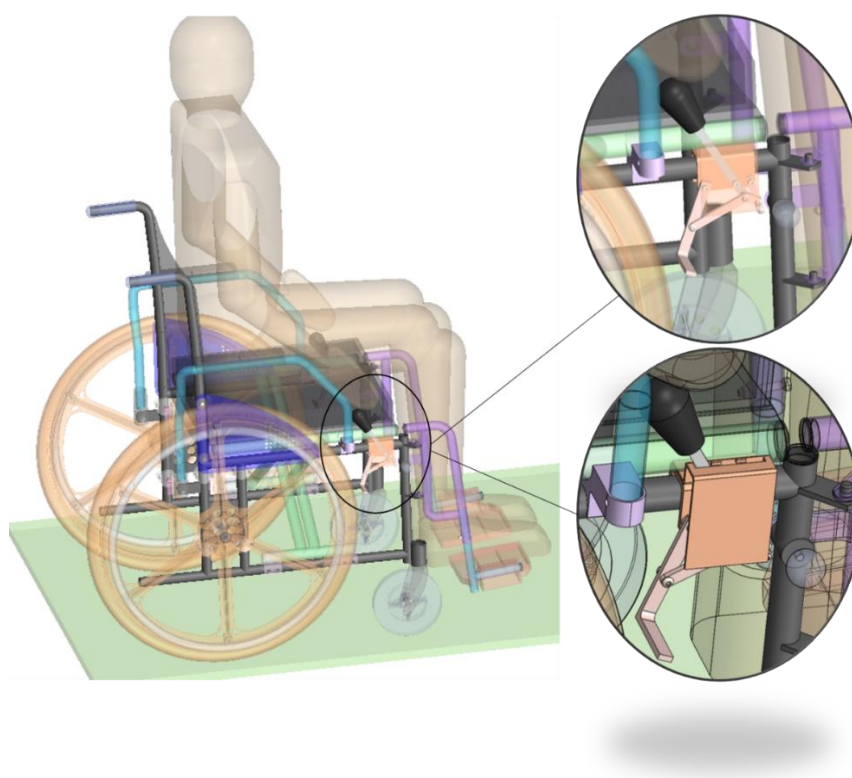


Figura 5.4 – Mecanismos frontal de acionamento, com três posições de operação.

O módulo de motorização foi concebido em duas unidades interdependentes, tanto elétrica como eletrônica, no entanto as unidades operam mecanicamente independentes em cada uma das rodas, para garantir que a cadeira de rodas possua os graus de liberdade inerente a flexibilidade dos seus componentes, como rodas e chassi.

A Figura 5.5 está representada a unidade esquerda do módulo, enquanto o lado oposto compreende a representação enantiomorfa.

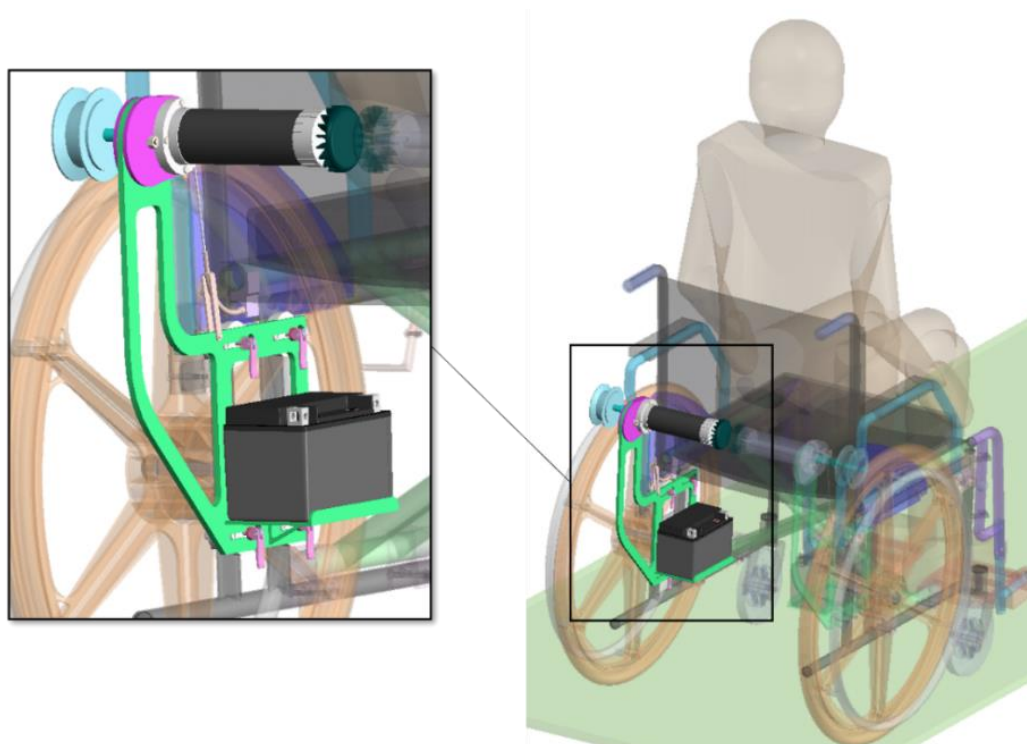


Figura 5.5 – Representação evidenciada do lado esquerdo do módulo de propulsão.

A Figura 5.6, está representada a montagem do kit de motorização na cadeira de rodas, enquanto a Figura 5.7 ilustra a supressão da cadeira de rodas dando ênfase aos componentes virtualmente posicionados na condição de operação do sistema.

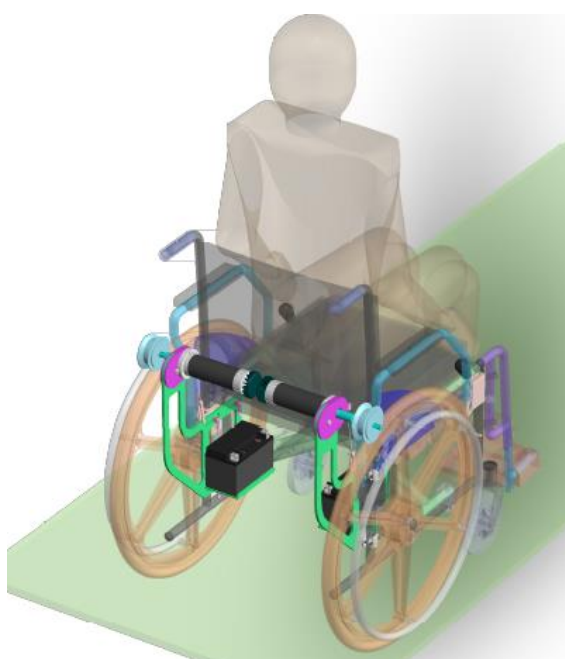


Figura 5.6 – Kit de motorização salientado, em função da transparência da cadeira de rodas.

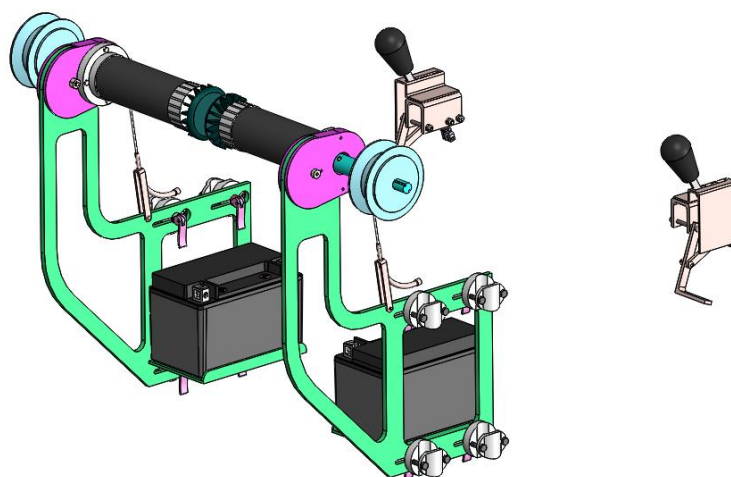


Figura 5.7 – Kit de motorização da 1ª proposta de solução virtualmente posicionados.

A Figura 5.8, representa uma vista em perspectiva frontal e posterior, onde é possível destacar que o conjunto de motorização montado apresenta relativamente uma baixa proporção volumétrica de ocupação com relação ao volume da cadeira de rodas, o que denota possível vantagem estética e funcional com relação a valorização do dispositivo.

As representações em vistas frontal (Figura 5.9a), posterior (Figura 5.9b), lateral esquerda (Figura 5.9c) e superior (Figura 5.9d), completam a melhor averiguação da condição geral de montagem do módulo de propulsão à CRs.

No Apêndice B, tem-se a tabela com o peso da cadeira, do kit de motorização e seus respectivos componentes, além do *Dummy* utilizado para as simulações.

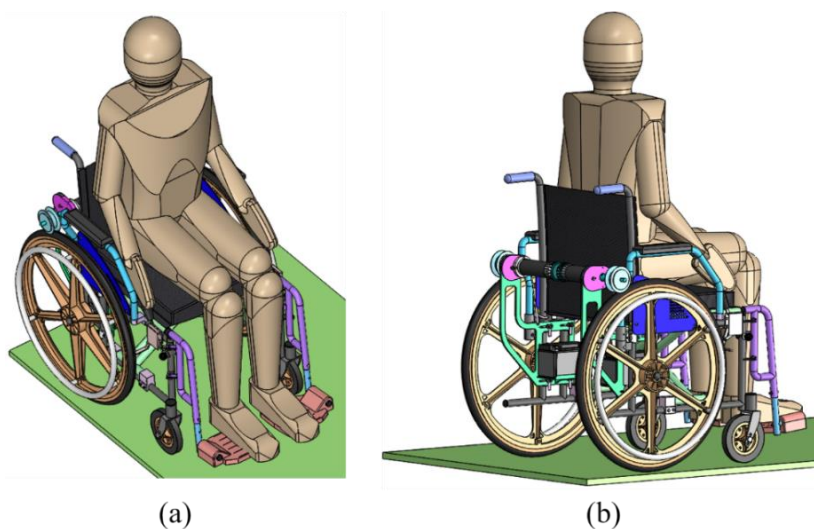


Figura 5.8 – Vista em perspectiva da montagem do kit de motorização (a) Vista em perspectiva anterior, (b) Vista em perspectiva posterior.

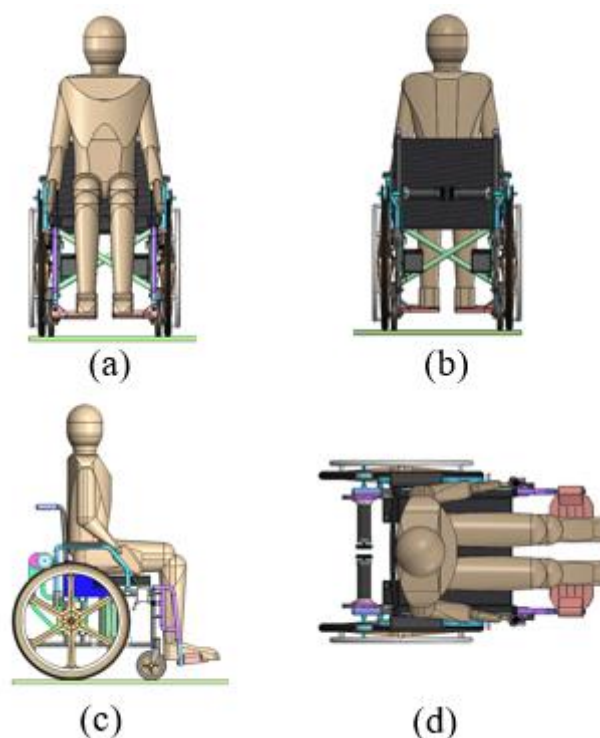


Figura 5.9 – Vistas da motorização da cadeira de rodas (a) Vista Frontal, (b) Vista Posterior, (c) Vista Lateral Esquerda, (d) Vista Superior.

5.2 Procedimento de simulação do protótipo

A realização das simulações tem como meta promover resultados, que indiquem as condições de indicação de elementos comerciais necessários para a sua aquisição. Isso possibilitará a construção do módulo de propulsão consistente e funcional.

A simulação propõe a interação entre os quatro pneus e o pavimento, bem como a interação entre os rolos de propulsão e os pneus traseiros da CRs, considerando que todas as interações de contato serão dadas pela Teoria de Contato de Coulomb.

Para atender algumas demandas importantes de cálculo pelo software MSC.ADAMS®, alguns parâmetros, como os coeficientes de atrito estático e dinâmico, apresentaram um grande desafio de correlação, devido os poucos dados na literatura. Com isso para esta simulação esses dados foram de $\mu_e = 0,76$, como coeficiente de atrito estático e de $\mu_d = 0,8$, como coeficiente de atrito dinâmico, de acordo os procedimentos e os materiais utilizados, segundo o trabalho Giesber (2012).

Ainda sobre o Software MSC.ADAMS®, os parâmetros físicos como a densidade dos materiais, foram adequados para atender as massas equivalentes do sistema, exceto para o caso do *Dummy*, onde os valores ajustados obedeceram o estudo que estipula a média de peso para homens entre 17 e 60 anos, como aproximadamente 70kg, e para mulheres entre 15 e 60 anos, a média é aproximadamente de 60kg (Paiva Neto e Peres, 2006).

As cadeiras de rodas manuais podem variar o peso entre 13kg a 17kg aproximadamente, além de apresentar configurações de ajustes de dimensionamento conforme a necessidade e condição de uso pelo usuário (Misch, 2020).

O modelo apresenta o *Dummy* com massa de aproximadamente 100kg, cujo objetivo é atender maior variabilidade de usuários ampliando a faixa de peso. A tabela com as massas equivalentes da cadeira de rodas, kit de motorização e *Dummy*, estão descritos no Apêndice B.

Na co-simulação, a planta do MSC.ADAMS®, fornece como parâmetros de saída, os dados de velocidade linear longitudinal da CRs, velocidade angular dos rolos e das rodas traseiras, além de torque de saída dos rolos.

A planta do MATLAB/Simulink®, utiliza o vetor de velocidade objetivo, através do bloco de controle *PI controller*, para fornecer o torque necessário ao módulo de propulsão. Vale ressaltar que os ganhos do controlador foram ajustados para os parâmetros Proporcional igual a 10 e Integral igual a 0,79. O procedimento de ajuste até a obtenção dos valores mencionados iniciou-se adotando ganho Proporcional igual a 1 e Integral igual a 0. Dessa forma foram feitos incrementos de 1 para Proporcional e de 0,01 para Integral até atingir os resultados desejados para a obtenção das melhores condições de desempenho do conjunto motorizado no modelo.

As simulações desse trabalho foram adotadas como integração de passo fixo, utilizando o *solver* ODE8, considerando o passo de integração de 0,005, tanto para o MATLAB/Simulink®, como para os cálculos do bloco do MSC.ADAMS®, que apresenta comunicação por etapa de saída igual a 1.

Dentro do mesmo ambiente é possível calcular a potência do motor elétrico, utilizando as variáveis de saída da planta do Multicorpos.

A modelagem em *Computer Aided Design* (CAD) da cadeira de rodas, módulo de propulsão e o *Dummy* foram inseridos no MSC.ADAMS®, conforme ilustrado na Figura 5.10.

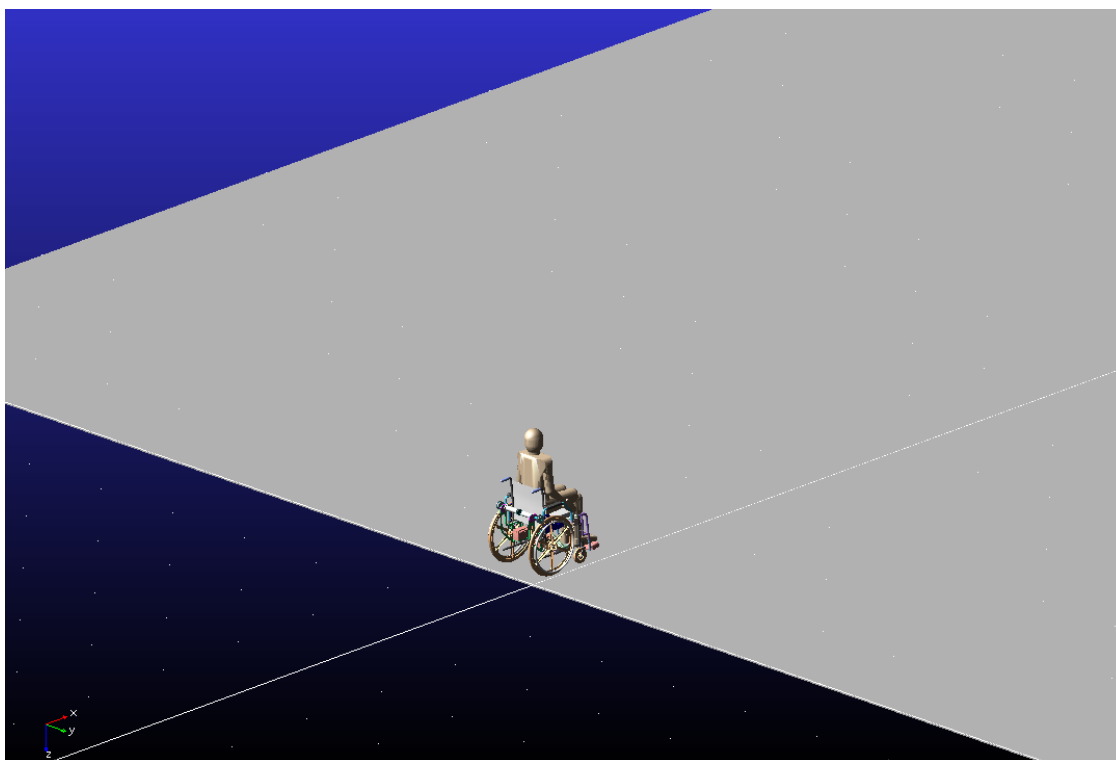


Figura 5.10 – Modelo representado no MSC.ADAMS®.

A simulação obtida pelo diagrama de blocos, representada pela Figura 5.11, apresenta a velocidade longitudinal da CRs como parâmetros de entrada de controle e o torque fornecido para cada rolo, como os parâmetros de saída do controlador e entrada na planta do MSC.ADAMS®.

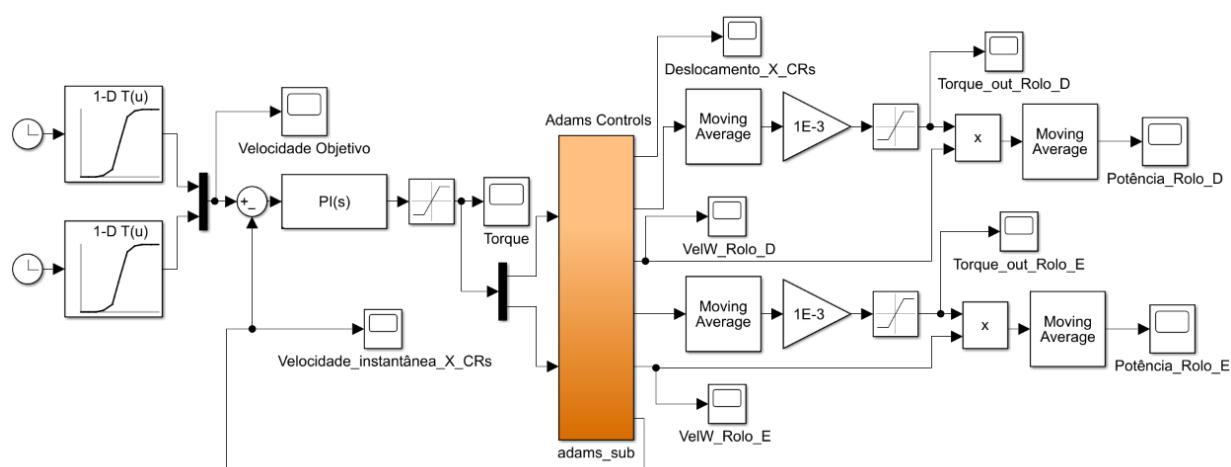


Figura 5.11 – Diagrama de blocos do modelo no MATLAB/Simulink®.

As simulações serão realizadas seguindo três configurações de inclinação de pavimento com duas configurações de velocidade objetivo longitudinal da cadeira de rodas.

As características de inclinação de pavimento são: Pavimento plano, combinação de pavimento plano e inclinado a 3,5% e combinação de pavimento plano e inclinado a 5%, conforme representado pela Figura 5.12(a), (b) e (c) respectivamente.

As características velocidade objetivo são: Velocidade em rampa até patamar de 4,5km/h e velocidade em degrau com patamar de 4km/h, conforme representado pela Figura 5.13.

As sequências de simulações obedecerão às seguintes combinações:

Primeira simulação, velocidade objetivo em rampa até a cadeira de rodas atingir 4,5km/h em pavimento plano.

Segunda simulação, velocidade objetivo em degrau, sendo a velocidade objetivo máxima de 4km/h em pavimento plano.

Terceira simulação, velocidade objetivo em rampa até a cadeira de rodas atingir 4,5km/h em pavimento inclinado de 3,5%.

Quarta simulação, velocidade objetivo em rampa até a cadeira de rodas atingir 4,5km/h em pavimento inclinado de 5%.

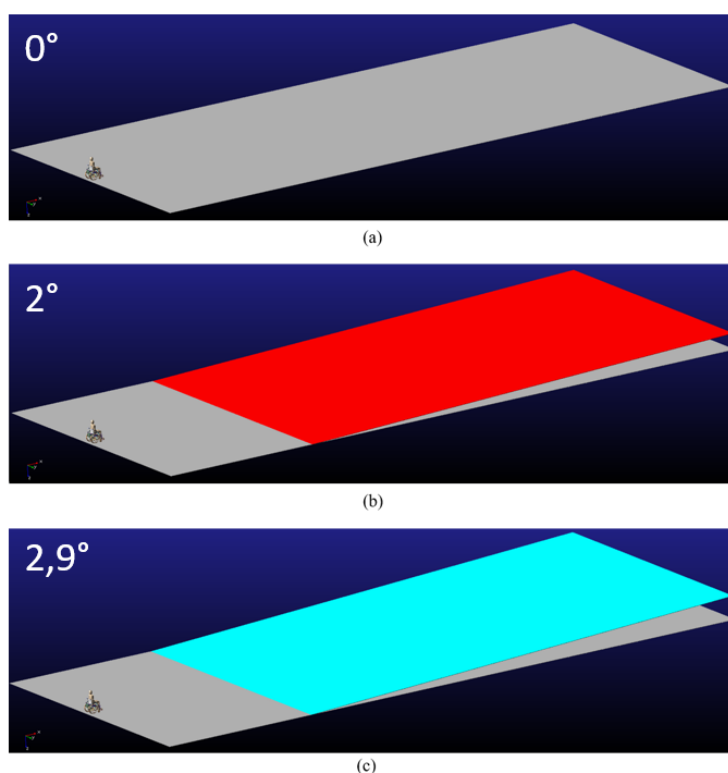


Figura 5.12 – Configurações de inclinação de pista das simulações. (a) Pavimento plano, (b) Combinação de pavimento plano e inclinado a 3,5%, (c) Combinação de pavimento plano e inclinado a 5%.

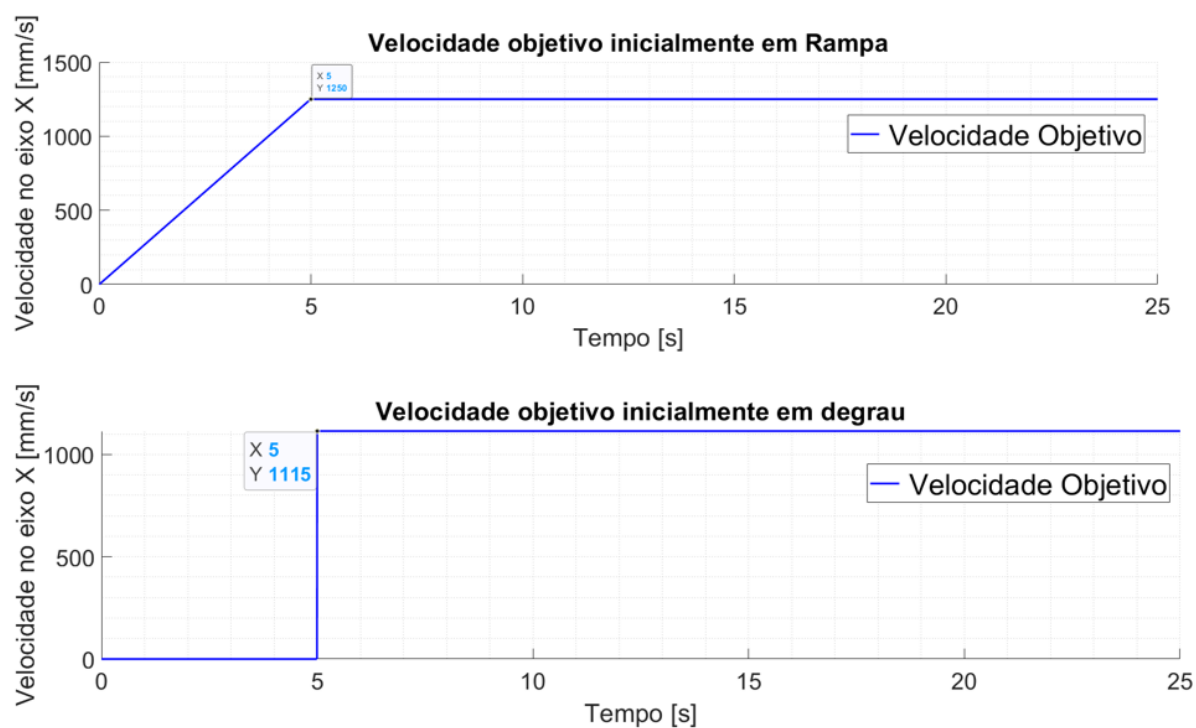


Figura 5.13 – Configurações de velocidade objetivo das simulações.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A primeira simulação, foi configurada em pavimento plano com velocidade objetivo em rampa, cuja característica faz a CRs sair do repouso e atingir 1250mm/s (4,5km/h) em 5 segundos. E a partir disso, o controle tende a aproximar e manter a velocidade exigida, representada pela Figura 6.1.

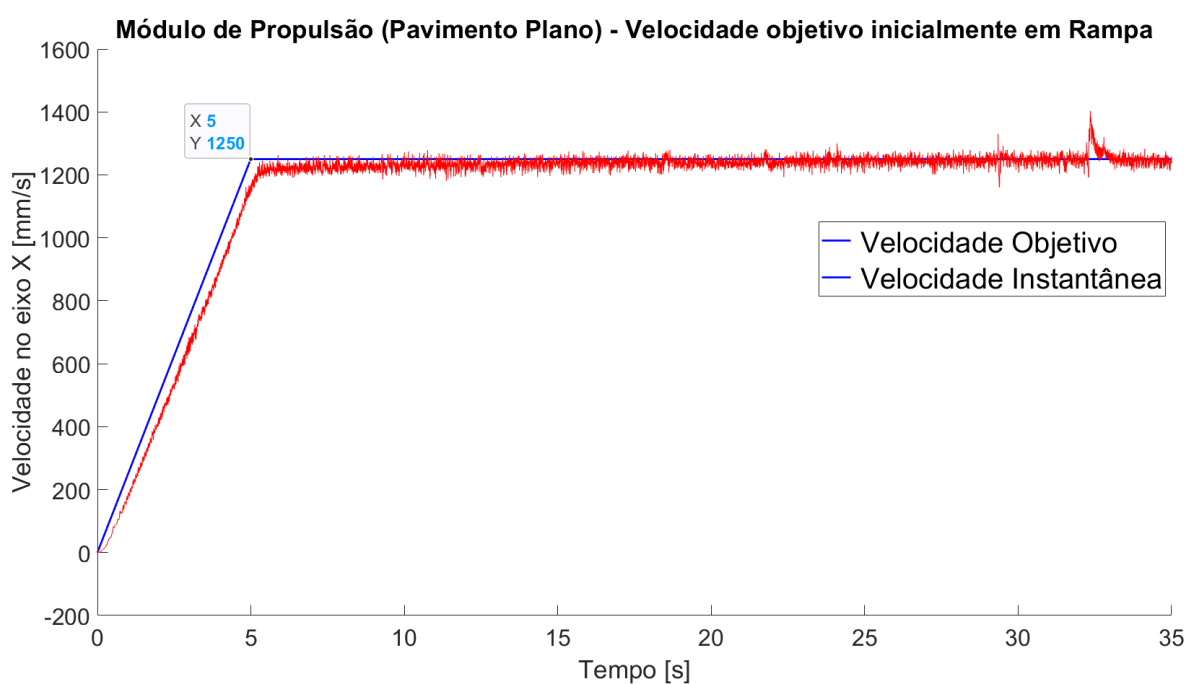


Figura 6.1 – Curva de velocidade da CRs, em pavimento plano.

A Figura 6.2, está representada a curva de deslocamento da CRs, com relação ao eixo longitudinal, onde a cadeira de rodas faz uma trajetória aproximadamente linear, com deslocamento de aproximadamente 40 metros em 35 segundos.

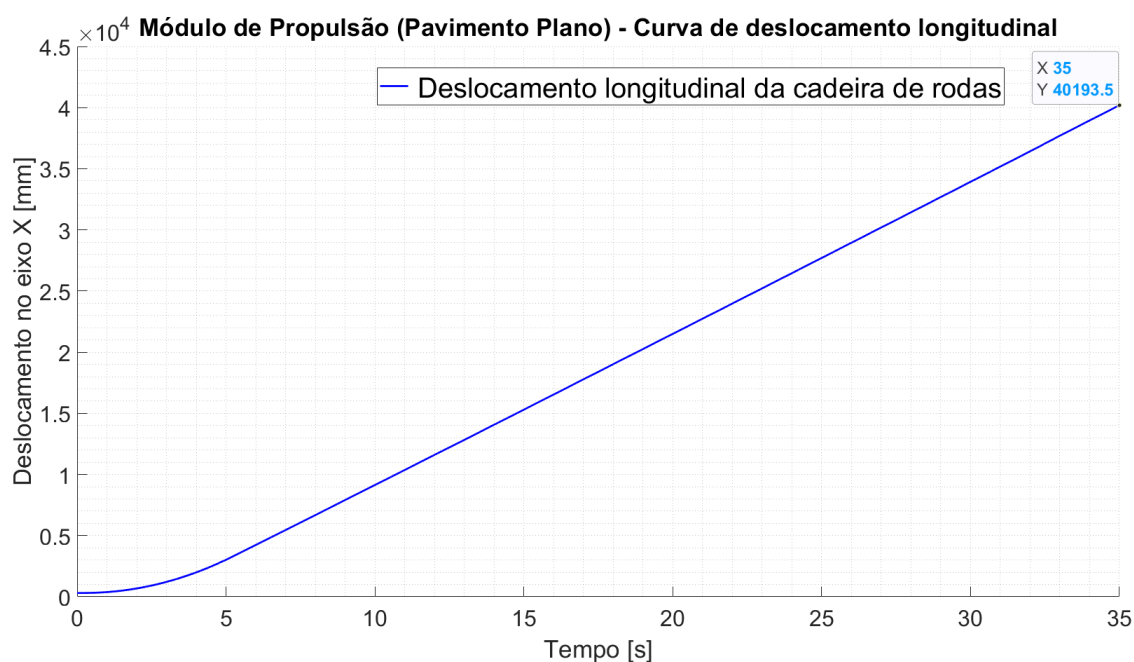


Figura 6.2 – Curva de deslocamento longitudinal da CRs, em pavimento plano.

A Figura 6.3a, estão ilustradas duas curvas, a primeira relativa ao torque de saída, que exige aproximadamente 1,3Nm por motor, no ponto de maior requisição durante a aceleração, enquanto que no regime de velocidade constante é exigido menor potência dos motores.

Na Figura 6.3b, a curva de potência exige uma demanda próxima dos 40W por motor no ponto final desta aceleração, entretanto quando a velocidade objetivo fica em patamar constante, esse valor cai para próximo da metade durante a manutenção dos 4,5 km/h.

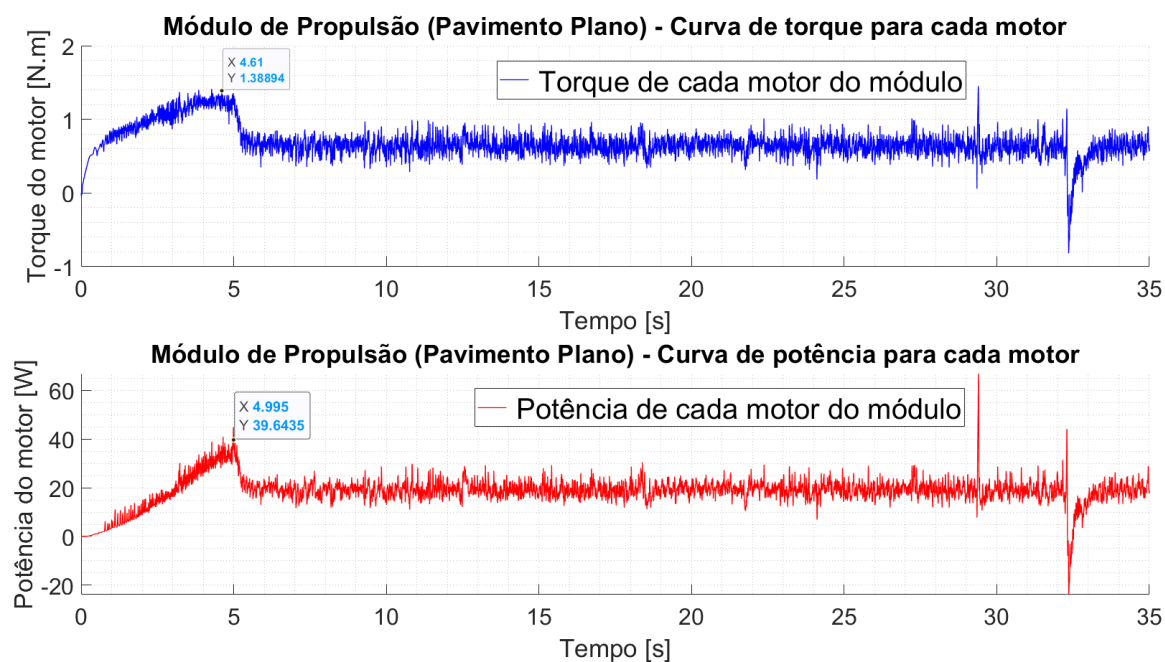


Figura 6.3 – (a) Curva de torque por motor, (b) Curva de potência por motor.

A segunda simulação, manteve o pavimento plano com velocidade objetivo em degrau, cuja característica faz a CRs permanecer em potencial repouso até que o controlador fornece velocidade constante de 1115mm/s (4km/h).

A Figura 6.4, o intervalo entre 5 a 6 segundos, quando a cadeira recebe entrada de torque de forma abrupta, ocorre o levantamento dos rodízios provocado pelo deslocamento do centro de gravidade, retomando a posição de equilíbrio rapidamente, em menos de 1 segundo.

Após a estabilização da cadeira sobre o pavimento, o controle promove a aproximação da velocidade da CRs para a velocidade objetivo pela influência do fator integral.

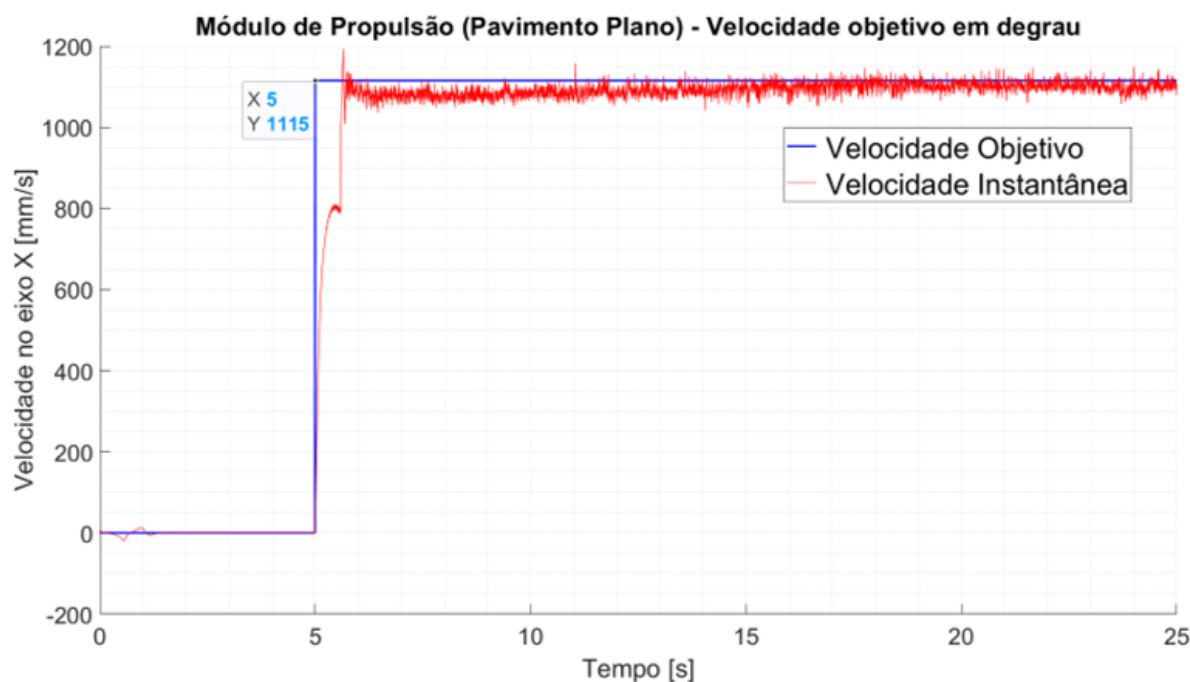


Figura 6.4 – Curva de velocidade da CRs, em pavimento plano (velocidade objetivo em degrau).

A terceira simulação, propõe a alteração na inclinação do pavimento, adotando 3,5% de acline. Busca-se uma avaliação do desempenho no contato entre rolo e pneu, além de mensurar e quantificar os valores de torque e potência, na alteração da inclinação do pavimento.

A Figura 6.5, evidencia que no tempo anterior à 10 segundos o comportamento físico da cadeira de rodas é semelhante a primeira simulação, entretanto com a imposição da rampa de acline, a cadeira perde velocidade imediatamente com início da subida, devendo o controle retomar o valor da velocidade objetivo.

A Figura 6.6, apresenta o deslocamento da CRs, e nesse caso foi mantida a velocidade objetivo semelhante a primeira simulação, alertando apenas a inclinação do pavimento. Dessa forma naturalmente a velocidade foi reduzida até o controle ajustar a velocidade instantânea. Situação correspondente aos valores de torque e de potência representados pela Figura 6.7.

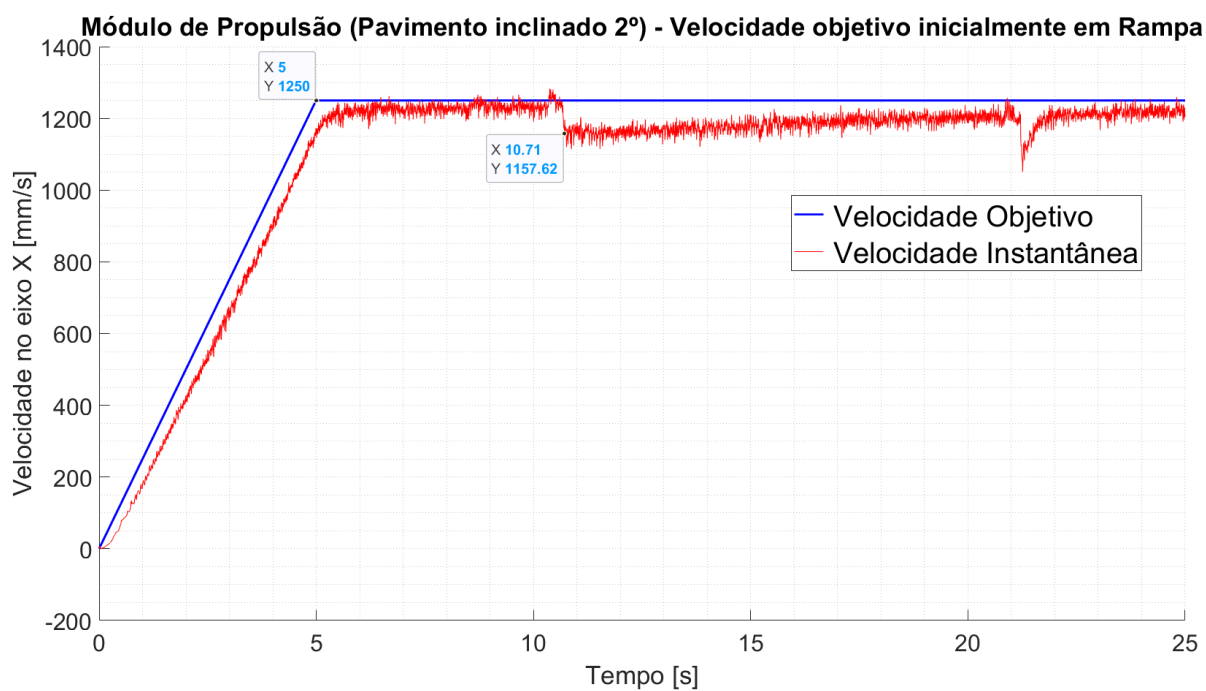


Figura 6.5 – Curva de velocidade da CRs, em pavimento com aclave de 2°.

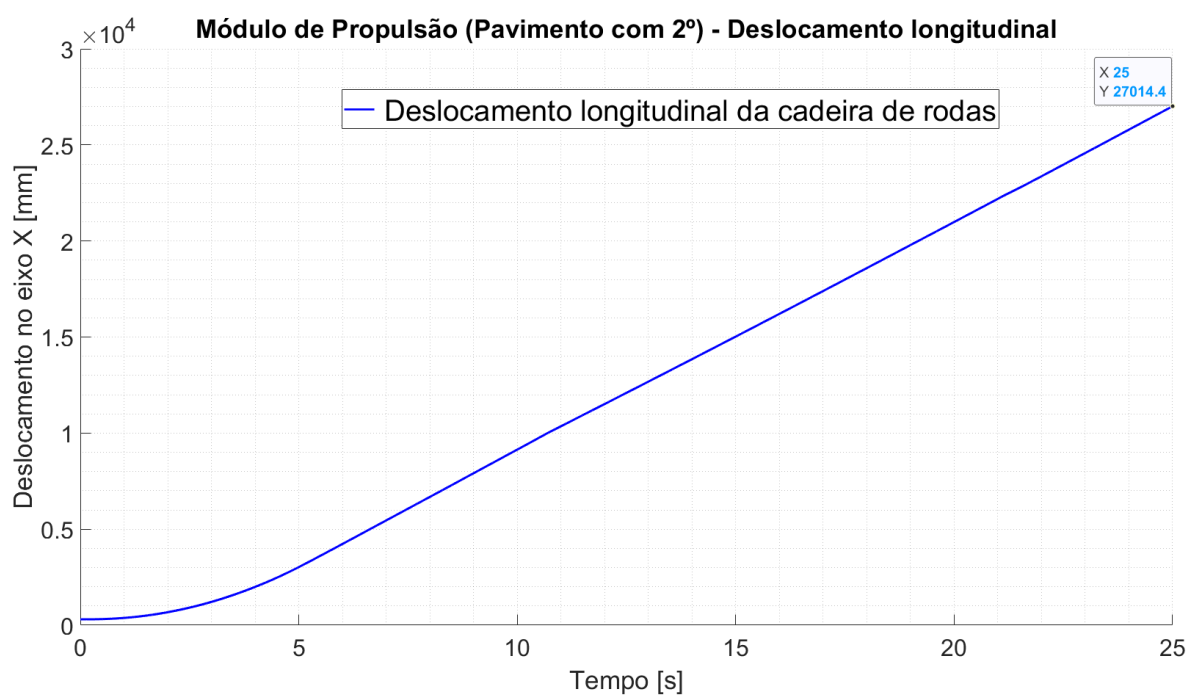


Figura 6.6 – Curva de deslocamento longitudinal da CRs, em pavimento com aclave de 2°

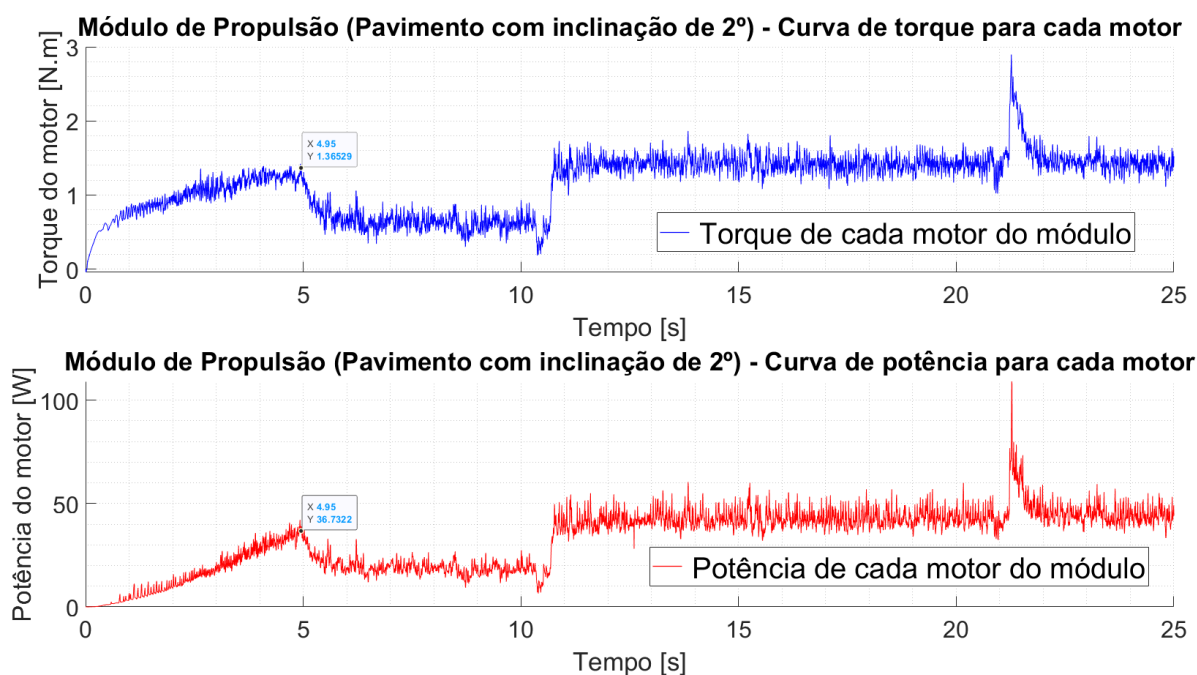


Figura 6.7 – (a) Curva de torque por motor, (b) Curva de potência por motor. Ambos com pavimento com aclive de 2°.

A quarta situação, a cadeira de rodas motorizada foi colocada sobre um pavimento com inclinação de 5%, condição de máxima inclinação para vias, segundo a NBR 9050 (2015).

A elevação da inclinação da pista de rolamento com relação a simulação anterior, demonstra maior exigência de potência dos motores elétricos.

O contato entre o rolo e o pneu apresenta aderência suficiente para o deslocamento da CRs durante a inclinação máxima de via. As características de desempenho da velocidade, torque e potência neste cenário de simulação estão apresentadas respectivamente na Figura 6.8 e na Figura 6.9.

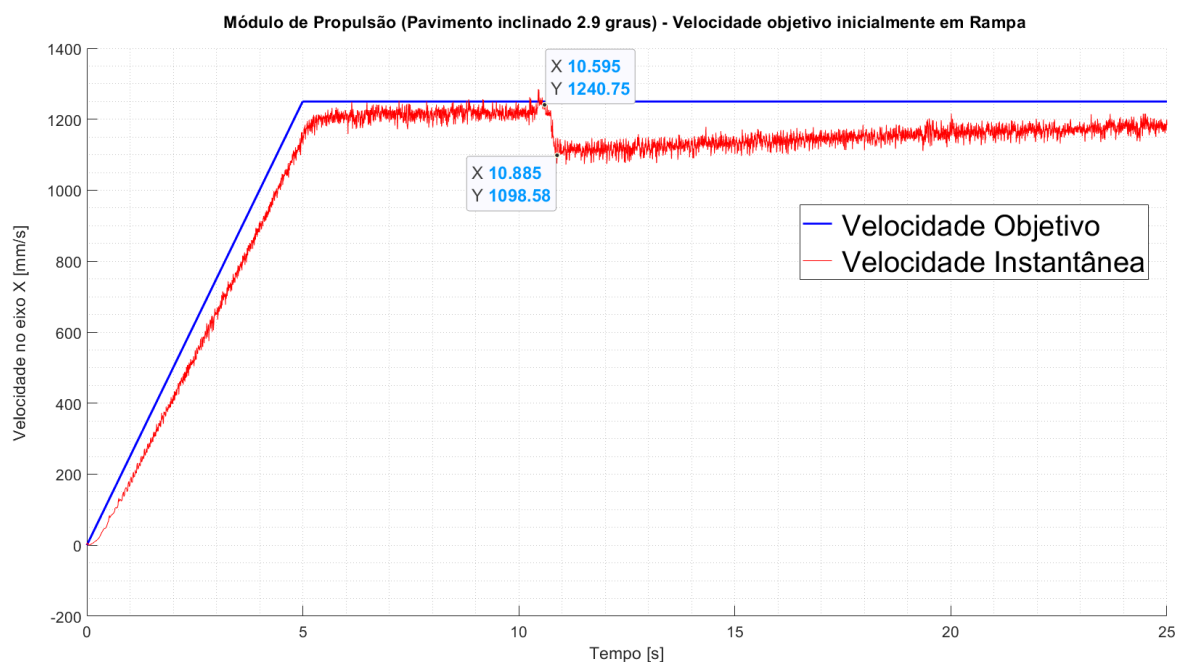


Figura 6.8 – Curva de velocidade da CRs, em pavimento com alicive de 2,9°.

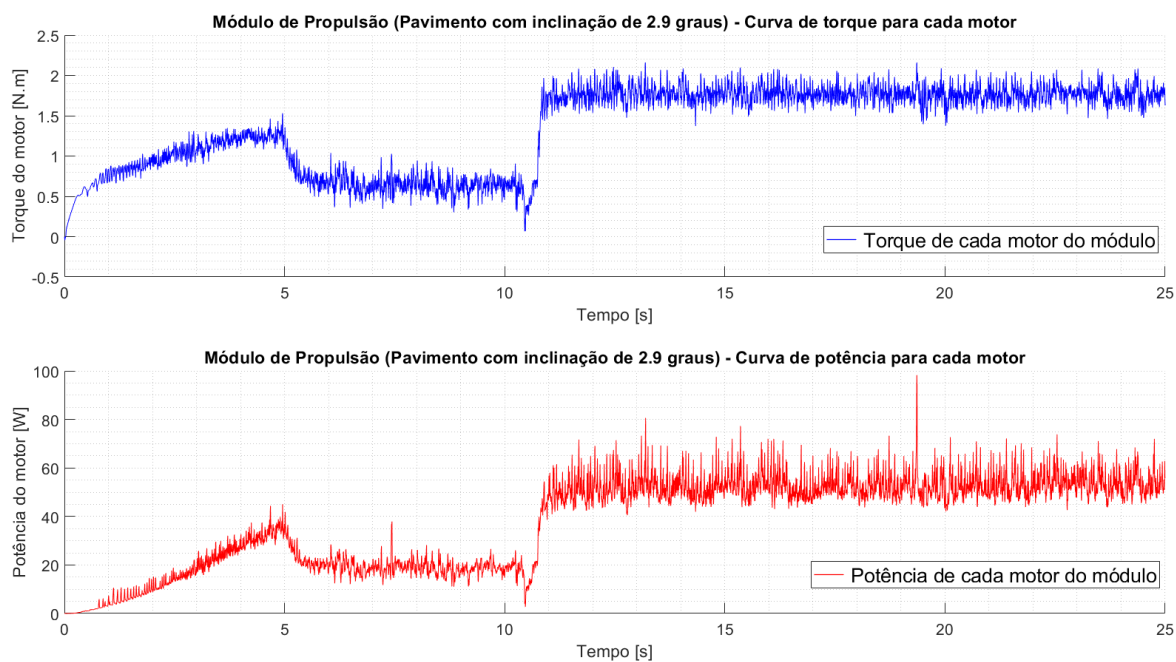


Figura 6.9 – (a) Curva de torque por motor, (b) Curva de potência por motor. Ambos com alicive de 2,9°.

7 PROTÓTIPO FÍSICO

Neste capítulo, será apresentada a descrição de desenvolvimento da construção do protótipo funcional baseado na primeira proposta de solução.

Embora algumas características estejam apresentadas de maneira diferente na construção do protótipo comparado a proposta de solução do estudo de viabilidade, as divergências são devidas a viabilidade construtiva e disponibilidade dos recursos para a construção.

A construção da estrutura de suporte do kit de motorização foi construída em madeira, compensado naval de 18mm de espessura, conforme apresentado na Figura 7.1.



Figura 7.1 – Estrutura de suporte do kit de motorização construído em Madeira.

Os componentes elétricos e eletrônicos necessários para a construção desse protótipo estão descritos na Tabela 7.1:

Tabela 7.1 – Descrição dos componentes elétricos e eletrônicos relativos à construção do protótipo.

Tabela de descrição dos elementos da descrição do protótipo.		
Descrição	Quantidade	Ilustração
Bateria de Chumbo de 33Ah	1	
Motor DC de Ímã permanente.	2	
Driver BTS7960 (Ponte H)	2	
Arduino Uno R3	1	
Cooler 40x40mm	1	
Módulo relê	1	
Módulo Regulador de Tensão Step Down LM2596	1	
Interruptor	1	
Módulo Joystick	1	

Os elementos eletrônicos foram montados em uma caixa produzida em impressora 3D, conforme apresentada na Figura 7.2. Todas as peças produzidas em impressora 3D para o protótipo foram aplicadas o método de *Fused Deposition Modeling* (FDM).

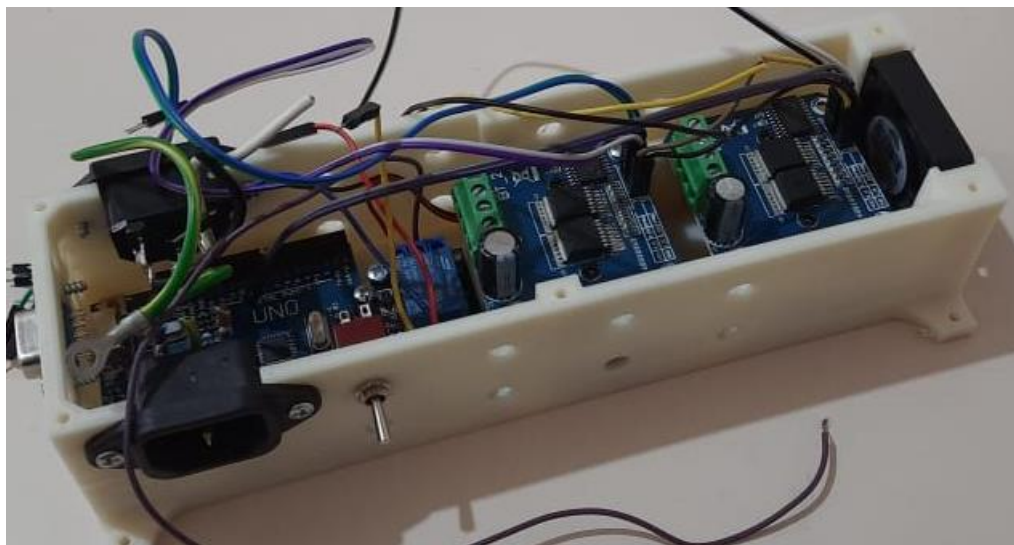


Figura 7.2 – Caixa de eletrônicos produzida em impressora 3D pelo método de FDM.

O controle da CRs, ocorre devido a manipulação do *joystick*, e sua configuração de posicionamento do dispositivo de controle com relação à posição na cadeira de rodas pode ser ajustado para atender usuários de diferentes antropometrias, no caso da configuração de montagem apresentada nesse trabalho está montada no braço direito da CRs, conforme ilustrado na Figura 7.3.

A carcaça de suporte e apoio do joystick foi construída em impressão 3D. A regulação pode ser vertical, com auxílio de ferramenta ou longitudinal através da regulação manual sob o controle de *joystick*.



Figura 7.3 – Dispositivo de controle da cadeira de rodas por *Joystick*.

Os dispositivos de anexação utilizados para fixar a estrutura de suporte do kit de motorização a CRs, indicados na Figura 7.4, apresentam dois parafusos por peça e quatro peças por estrutura de suporte da CRs, sendo todos construídos em impressão 3D.



Figura 7.4 – Dispositivo de fixação da estrutura de suporte do kit de motorização.

A Figura 7.5, apresenta a vista lateral do conjunto motorizado com a montagem do sistema de controle fixo no braço direito na cadeira de rodas, uma vez que o dispositivo pode ser configurado também no braço esquerdo a depender da necessidade de controle pelo usuário.



Figura 7.5 – Representação em vista lateral do protótipo físico.

A Figura 7.6, apresenta vista frontal da cadeira de rodas, e nessa perspectiva apresenta uma característica relevante, de que o conjunto motorizado apresenta baixo volume lateral, sendo assim, não ultrapassa as dimensões laterais da cadeira de rodas, tornando-o mais compacto.



Figura 7.6 – Representação em vista frontal do protótipo físico.

A Figura 7.7, apresenta vista em perspectiva posterior, onde o sistema de motorização fica em destaque. A Figura 7.8, ilustra os dispositivos ampliados com objetivo de enfatizar características desenvolvidas no estudo de viabilidade apresentado nos capítulos anteriores.

As peças do aro do pneu de propulsão foram projetadas em CAD e manufaturadas em impressora 3D, utilizando material bioplástico conhecido como Ácido Polilático (PLA), tanto para o aro como para os demais componentes citados nesse capítulo.

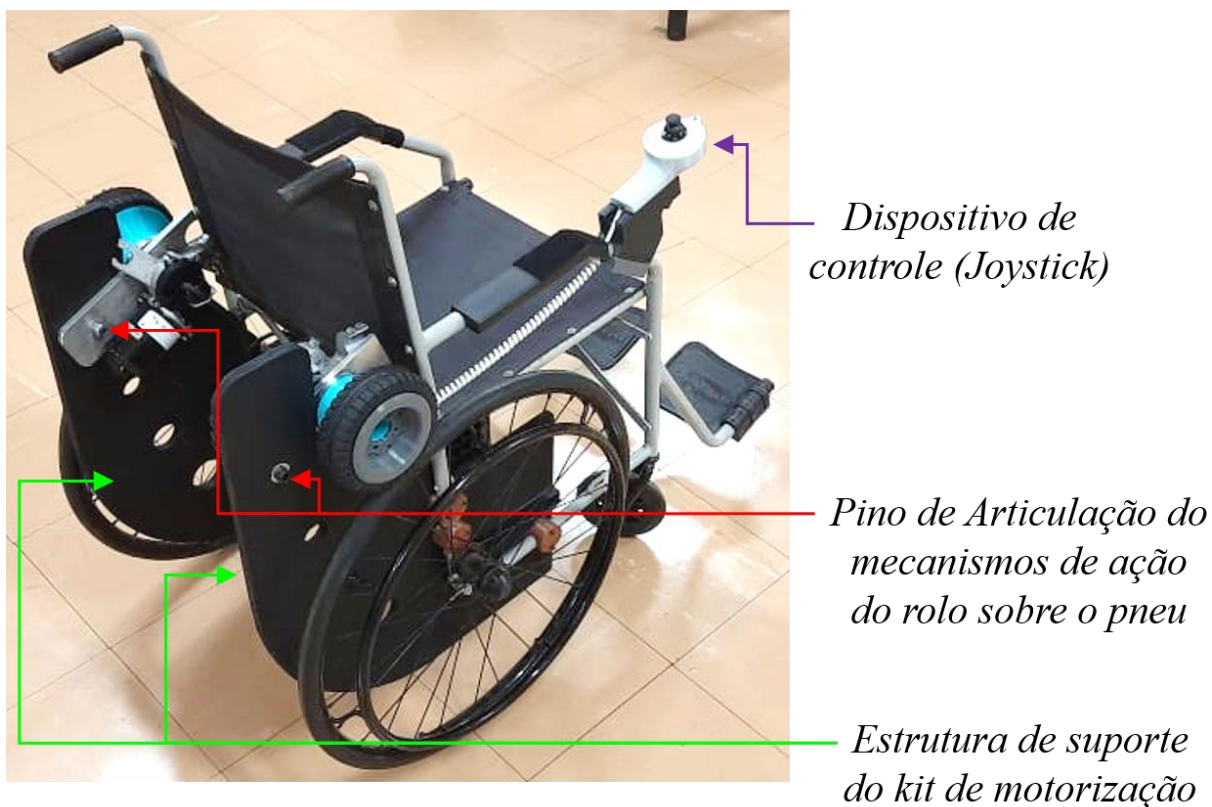


Figura 7.7 – Representação em perspectiva posterior do protótipo físico.

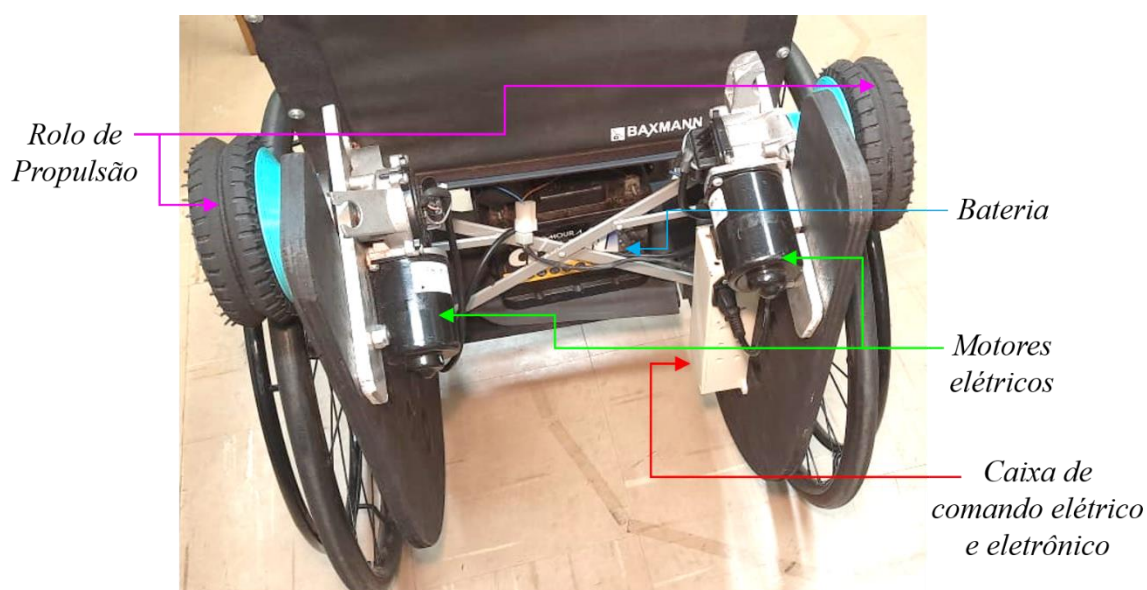


Figura 7.8 – Representação ampliada dos dispositivos do módulo de propulsão em perspectiva posterior do protótipo físico.

Os testes do protótipo físico podem ser acompanhados pelo vídeo através do link de acesso pelo endereço:

<https://sites.google.com/dac.unicamp.br/qmcrs-aquilachagas/in%C3%ADcio>.

No Apêndice C está ilustrado o esquema de ligação elétrico e eletrônico da montagem do kit de motorização da cadeira de rodas.

No Apêndice D está descrito o código de controle utilizado nos testes do protótipo físico.

8 CONCLUSÕES

Os objetivos foram satisfeitos, sendo o primeiro deles atendido nas primeiras seções desse trabalho, quando a ampla pesquisa de similares demonstrou as alternativas com características distintas de solução, que geraram ideias e suporte para o desenvolvimento de uma solução promissora para o mercado.

A segunda e importante proposta para dessa dissertação, consistiu em modelagem CAD, cujas características foram fundamentais para antecipar comportamentos do sistema, desde o processo de montagem e desmontagem do módulo à CRs, ou no mecanismo posicionador do rolo de propulsão sobre o pneu da roda traseira.

Outra solução relevante do desenvolvimento da metodologia de projeto, foi a solução escolhida para a fixação do kit à cadeira de rodas, obtidas especificamente na decorrência imediata do processo criativo, onde atenderam também os objetivos de montagem e desmontagem pela associação das DFA e DFD.

As etapas do estudo de viabilidade que foram apresentadas no desenvolvimento desse trabalho, desde a necessidade do consumidor na revisão da literatura, passando pela análise funcional, com a exploração do desdobramento funcional. O processo criativo foi atendido pelo desenvolvimento do quadro morfológico, e posteriormente a filtragem do QM para as respectivas propostas de solução como penúltima fase das etapas do estudo de viabilidade. A partir desse resultado, a proposta de solução foi encaminhada para a modelagem matemática da dinâmica do conjunto motorizado.

Os resultados das simulações apresentadas no capítulo 5, demonstraram que a implementação do modelo de controle da cadeira foi adequada para o desempenho em pavimento plano e inclinado até 5% (condição de máxima inclinação das vias), conferindo resultados mais próximos da realidade.

Os resultados das simulações demonstraram a efetividade do modelo de contato, sob a atuação de torque e potência do motor elétrico, em diferentes exigências de subida, o que fornece características do modelo virtual com suporte para a construção de um protótipo físico.

A construção desta dissertação permitiu o estudo da dinâmica veicular, e suas aplicações na cadeira de roda, além da aplicação da metodologia de projeto que tem sido já utilizada e consolidada por trabalhos anteriores no LabSIn, e com o resultado desse trabalho demonstra novamente a robustez dessa metodologia.

9 TRABALHOS FUTUROS

Ao final da realização desse trabalho, algumas ideias surgiram para fomentar outros trabalhos correlacionados. São elas:

- Aplicar a metodologia de projeto para dispositivos de controle.
- Aplicação de novas ferramentas de metodologia, para interagir com as ferramentas apresentadas nesse trabalho.
- Desenvolver uma tabela comparativa sobre as características sobre as principais características das tipologias dos módulos.
- Execução das etapas da metodologia até o projeto detalhado.
- Aplicar ferramenta de otimização para as configurações do perfil de contato do rolo de propulsão.

Referências

2020 Mobility. Disponível em: <<https://www.2020mobility.com/contact-us/>>. Acesso em: 15 mar. 2021.

AAT Asia. Disponível em: <<https://www.aatasia.com.my/product/max-e/>>. Acesso em: 18 fev. 2021.

ABREU, P. S. **Desenvolvimento da Voz do Cliente no Desdobramento da Função Qualidade (QFD): aplicação em projetos de cadeira de rodas.** [s.l.] Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, 2010.

AC Mobility. Disponível em: <<https://acmobility.com.au/power-assist-wheelchair-devices/smart-drive-wheelchair-power-assist/>>. Acesso em: 25 nov. 2020.

Active Scooters. Disponível em: <<https://activescooters.com.au/products/lightdrive/>>. Acesso em: 23 mar. 2021.

Adaptive Specialties. Disponível em: <<https://www.adaptivespecialties.com/firefly-2-5-electric-scooter-attachment.aspx>>.

Alber GmbH. Disponível em: <<https://www.alber.de/en/>>. Acesso em: 10 abr. 2021.

ALVARENGA, F. B. **Desenvolvimento de sistemas de motorização alternativa para cadeiras de rodas convencionais.** [s.l.] Universidade Estadual de Campinas - Unicamp, 2002.

ALVARENGA, F. B. **Uma Abordagem Metodológica para o Projeto de Produtos Inclusivos.** [s.l: s.n.].

BAKKER, E.; NYBORG, L.; PACEJKA, H. B. **Tyre Modelling for Use in Vehicle Dynamics Studies.** , 1987.

BAKKER, E.; PACEJKA, H. B.; LIDNER, L. **A New Tire Model with an Application in Vehicle Dynamics Studies.** , 1989.

BATES, R. A Computer Input Device Selection Methodology for Users with High-Level Spinal Cord. **Proc. of the 1st Cambridge Workshop on Universal Access and Assistive Technology (CWUAAT)**, p. 1–4, 2002.

BONINGER, M. The Power Wheelchair: What the SCI Consumer Needs to Know. **SCI Model**

Systems, 2011.

BRASIL. Programa Viver sem Limites. Disponível em: <<https://www.gov.br/mdh/pt-br/sdh/noticias/2016/fevereiro/viver-sem-limite-recebe-premio-internacional-de-boas-praticas>>. Acesso em: 9 abr. 2021.

Burbach + Goetz. Disponível em: <<https://www.burbach-goetz.de/mobilitaet-und-agilitaet/rollstuhl-shop/rollstuhlantrieb/alber-e-motion-m25-neu-kraftverstaerkender-zusatzantrieb-fuer-rollstuehle-unterstuetzt-ihre-restkraft-24-rad-inkl-ecs-fernbedienung-zum-anbau-an-ihren-rollstuhl/a-14203>>.

BUTTS, F. B.; GOWEN, J. D. MANUAL WHEELCHAIR POWER ASSIST. , 2013. Disponível em: <<https://patentimages.storage.googleapis.com/c5/22/95/19e6bc7d4d942d/US8388010.pdf>>

CARE, U. UNAwheel Mini Basic & Active. , 2019. Disponível em: <<https://www.manualslib.com/download/1850279/Unacare-Unawheel-Mini-Basic.html>>

Casadapt. Disponível em: <<https://casadaptada.com.br/2014/08/com-max-e-sua-cadeira-de-rodas-manual-fica-motorizada-em-2-minutos/max-e-kit-amigos-cadeirantes/>>.

Cavenaghi. Disponível em: <<https://www.cavenaghi.com.br/cadeira-de-rodas-motorizada-stand-up-44-preta-jaguaribe/p>>. Acesso em: 11 abr. 2021.

Conforpes. Disponível em: <<https://blog.conforpes.com.br/dr-responde/tipos-de-cadeira-de-rodas/>>. Acesso em: 11 abr. 2021.

DEDINI, F. G. et al. Dispositivo assistivo de interface homem-máquina e equipamento controlados pelo mesmo. , 2012.

DEDINI, F. G.; ALVARENGA, F. B. Módulo de locomoção para motorização de veículos e cadeira de rodas manual convencional convertida em cadeira de rodas motorizada. , 2006.

DEDINI, F. G.; SILVA, L. C. D. A. E; HANZAWA, V. A. Kit de motorização para cadeira de rodas e veículo auto guiado. , 2013.

DEFICIÊNCIA, V. SEM L.-P. N. DOS D. DA P. C.; SDH, S. DE D. H.-; SNPD, S. N. DE P. D. DA PESSOA COM D.-. VIVER SEM LIMITE – Plano Nacional dos Direitos da Pessoa com Deficiência. , 2013.

DELGADO NETO, G. G. et al. Kit de motorização para cadeiras de rodas manuais. 2008.

DELGADO NETO, G. G. **Desenvolvimento e aplicação de um programa computacional, para abordagem sistemática de desenvolvimento de produtos e serviços.** [s.l: s.n.].

EDMUND F. LOPRESTI. **POWER APPARATUS FOR WHEELCHAIRS.** , 2005. Disponível em: <<https://patentimages.storage.googleapis.com/53/97/df/444d5a26892aa3/US20050279551A1.pdf>>

ESFAHANI, M. I. M. et al. Optimization of double wishbone suspension system with variable camber angle by hydraulic mechanism. **World Academy of Science, Engineering and Technology**, v. 61, n. January 2010, p. 299–306, 2010.

FRANCO GIUSEPPE DEDINI. **Metodologia de Projeto.** , 2022.

GENTA, G. **Motor Vehicle Dynamics.** 1. ed. [s.l.] Word Scientific, 1997.

GIESBERS, J. Contact Mechanics in Msc Adams. p. 42, 2012.

GMBH, A. **e-fix E25 add-on drive simply explained.** , 2013. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=6jNDa7ylIIM&ab_channel=AlberGmbH>

GMBH, A. **E-MOTION power assist for wheelchairs.** , 2018. Disponível em: <<http://amemobility.com.au/wp-content/uploads/2018/11/TRC-Product-information-E-Motion-M25.pdf>>

GMBH, A. **smoov one O10.** , 2019.

Iaccess. Disponível em: <<https://www.iaccess.pt/loja-ortopedica/mobilidade/auxiliar-de-propulsao/alber-e-fix/>>. Acesso em: 18 fev. 2021.

JAGUARIBE, O. **Jaguaribe.** Disponível em: <<https://ortopediajaguaribe.com.br/produto/cadeira-de-rodas-fit/>>. Acesso em: 27 dez. 2022.

JAZAR, R. N. **Vehicle Dynamics: Theory and Application.** [s.l: s.n.].

JIANG, T. C.; YIN, S. H.; TANAKA, E. Wheelchair Able to Assist the Elderly to Move on Stairs and Stand up. **2019 58th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan, SICE 2019**, n. c, p. 1168–1173, 2019.

JOSÉ, T. Projeto De Uma Cadeira De Rodas De Atletismo. 2008.

LACERDA, D. L. C. **Dr. Luiz Cláudio Lacerda Rodrigues**. Disponível em: <<https://drluizclaudiorodrigues.com.br/sua-coluna>>.

LEAL, L. DA COSTA M.; ROSA, E. DA; NICOLAZZI, L. C. **Uma introdução à modelagem quase-estática de automóveis** Publicação interna do GRANTE Departamento de Engenharia Sumário. , 2012. Disponível em: <<https://docero.com.br/doc/vcx05e>>

LOMBARDI JUNIOR, A. DE B. **Desenvolvimento e modelagem de uma cadeira de rodas servo-assistida para crianças**. , 2002. Disponível em: <<https://repositorio.unicamp.br/acervo/detalhe/257719?guid=1667442803101&returnUrl=%2Fresultado%2Flistar%3Fguid%3D1667442803101%26quantidadePaginas%3D1%26codigoRegistro%3D257719%23257719&i=6>>

MATTOS, L. M. DE. Julgamento visual de cadeiras de rodas: contribuições para o design de produtos assistivos. **Dissertação de Mestrado apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre ao Programa de Pós-graduação em Design**, p. 94, 2017.

Merits Australia. Disponível em: <<https://meritsaustralia.com/product/power-pack-for-manual-wheelchair-p001f/>>.

MILLS, D.; MILLS, L. **MOTORIZED SCOOTER WHEELCHAIR ATTACHMENT DEVICE**. , 2010. Disponível em: <<https://patentimages.storage.googleapis.com/af/8f/13/008015422eedf4/US7694991.pdf>>

MISCH, J. P. **MECHANICAL PERFORMANCE CHARACTERIZATION OF MANUAL WHEELCHAIRS USING ROBOTIC WHEELCHAIR OPERATOR WITH INTERMITTENT TORQUE-BASED PROPULSION**. [s.l: s.n.].

MIZUNO MASAMITSU. **FOR POWER-ASSISTED WHEELCHAIR, CONTROL METHOD FOR POWER-ASSISTED WHEELCHAIR, PRO-GRAM, AND TERMINAL**. , 2019. Disponível em: <<https://patentimages.storage.googleapis.com/4e/5e/f3/c4501f2e419c88/WO2019053859A1.pdf>>

MOBILIT, M. Smartdrive MX2+. 2018.

MOBILITY, R. **Compatibility Guide for Wheelchair Attachments Compatibility Guide for Rigid Wheelchairs**. , 2019. Disponível em: <https://cdn.shopify.com/s/files/1/0156/5084/8816/files/Rio_fit_guide_12_24_19.pdf?1697>

MUNAKATA, Y.; TANAKA, A.; WADA, M. An Active-caster Drive System for Motorizing a Manual Wheelchair. n. August 2013, 2015.

NBR 9050. ABNT NBR 9050: Acessibilidade a edificações, mobiliário, espaços e equipamentos urbanos. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, p. 16, 2015.

OGILVIE, C., M. KHALILI, HFM VAN DER LOOS, J. B. **Como Os Add-Ons De Mobilidade Alteram As Condições De Carregamento Nas Estruturas Manuais Para Cadeiras De Rodas?** 2018.

OLIVEIRA, D. C. S. DE et al. Análise eletromiográfica de músculos do membro inferior em exercícios proprioceptivos realizados com olhos abertos e fechados. **Revista Brasileira de Medicina do Esporte**, v. 18, n. 4, p. 261–266, 2012.

ORTOBRAS. **Manual de instruções cadeira de rodas Gazela ulta lite infantil - AI.** , 2008a.

ORTOBRAS. **Manual de instruções cadeira de rodas ULX Motorizada (E4).** 2008b.

Ortoponto. Disponível em: <<https://www.ortoponto.com.br/produto/cadeira-de-rodas-motorizada-eletrica-e4-ulx-ortobras-dobavel-666>>. Acesso em: 11 abr. 2021.

PACEJKA, H. B. **Tire Characteristics and Vehicle Handling and Stability.** [s.l: s.n.].

PAIVA NETO, A.; PERES, F. P. Comparação da flexibilidade intermovimentos entre homens e mulheres : um estudo a partir do flexiteste adaptado. p. 124–133, 2006.

PANERO, J.; ZELNIK, M. **dimensionamento humano para espacos Internos.** 1. ed. [s.l.] Gustavo Gili,2002, 2008.

Push Mobility. Disponível em: <<https://www.pushmobility.com.au/products/smartdrive>>. Acesso em: 25 nov. 2020.

REMBOS, S. et al. **WHEELCHAIR STAIR ASSIST APPARATUS. System and Method for Programming a Weighing Scale Usinga Key Signal To Enter a Programming Mode,** 2011. Disponível em: <<https://patentimages.storage.googleapis.com/df/93/c8/e087569682316a/US7988157.pdf>>

RICHTER, M. **ASSISTIVE DRIVING SYSTEM FOR A WHEELCHAIR.** , 2016. Disponível em: <<https://patentimages.storage.googleapis.com/ae/6b/bc/59c3da157590e9/EP3061435A1.pdf>>

RICHTER; MARK. **Sistema de asistencia de movimiento para sillas de ruedas.** , 2021. Disponível em: <<https://patentimages.storage.googleapis.com/92/0d/e0/fb175c49c0118c/ES2804085T3.pdf>>

RILL, G. **Road Vehicle Dynamics: Fundamentals and Modeling.** [s.l: s.n.].

RIO Mobility. Disponível em: <<https://riomobility.com/collections/wheelchair-attachments/products/firefly-2-5-electric-attachment>>. Acesso em: 19 fev. 2021.

RODRIGUES, A. DE S. L. **Refinamento de uma metodologia de projeto direcionada para Tecnologia Assistiva, com abordagem participativa dos usuários.** , 2022.

SILVA, J. F. DA. Padrões de Propulsão para Cadeiras de Rodas e Seus Fatores de Desempenho. *Padrões de Propulsão para Cadeiras de Rodas e seus Fatores de Desempenho.* p. 202, 2009.

SILVA, L. C. DE A. E. **Identificação e simulações do comportamento do pneu visando a implementação de controle em cadeiras de rodas motorizadas.** [s.l.] Universidade Estadual de Campinas, 2011.

SIMPSON, R. et al. The smart wheelchair component system. **Journal of Rehabilitation Research and Development**, v. 41, n. 3 B, p. 429–442, 2004.

SIMPSON, R. et al. A prototype power assist wheelchair that provides for obstacle detection and avoidance for those with visual impairments. v. 11, p. 1–11, 2005.

SPINERGY. Disponível em: <<https://www.spinergy.com/products/zx-1-power-add>>. Acesso em: 9 abr. 2021.

SPORTS, H. I. **Alber SMOOV One Power Assist.** Disponível em: <<https://howirollsports.com/shop/alber-smoov-one-power-assist/>>. Acesso em: 23 abr. 2021.

SYNC Living. Disponível em: <<https://www.syncliving.co.uk/benefits-wheelchair-powerpack/>>. Acesso em: 16 dez. 2020.

SYNC Living. Disponível em: <<https://www.syncliving.co.uk/product/unawheel-mini/>>. Acesso em: 10 abr. 2021.

TALLINO, P. **POWER ADD-ON DEVICE FOR MANUAL WHEELCHAIR.** , 2013. Disponível em: <<https://patentimages.storage.googleapis.com/f9/69/a0/67cf8e149f11c3/US8430189.pdf>>

Think Mobility. Disponível em: <<https://thinkmobility.com.au/products/v-max-aat-310560>>.

TOMARI, M. R. M.; KOBAYASHI, Y.; KUNO, Y. Development of smart wheelchair system for a user with severe motor impairment. **Procedia Engineering**, v. 41, p. 538–546, 2012.

UNITED NATIONS, D. OF E. AND S. A. World Population Ageing 2017 report. **World Population Ageing 2017**, p. 1–124, 2017.

Vollenz Reabilitação. Disponível em: <<https://vollenz.com/os-5-principais-tipos-de-cadeira-de-rodas-e-qual-o-modelo-ideal-para-voce>>. Acesso em: 11 abr. 2021.

YINCONG, L. Y. L. W. H. Z. Z.; TIANJIAO, W. F. Z. Q. W. C. X. **Roda motriz para cadeira de rodas.** , 2020. Disponível em: <<https://patentimages.storage.googleapis.com/cf/b9/4c/9248c9cee3066f/CN211433755U.pdf>>

Apêndice A – Modelo complementar da teoria de Pneu por Pacejka

Equacionamento de Pacejka para modelo de 1987. (PAC87)

Segundo o modelo proposto por Bakker, Nyborg e Pacejka (1987), a partir de análises empíricas, baseando-se em coeficientes, torna-se possível mensurar o comportamento do pneu sob condição de frenagem em deslocamento retilíneo ou de rolagem em curva modo livre, obtendo esforços longitudinais, laterais e verticais do veículo sobre o pneu.

No que pretende aumentar a segurança dos veículos, o estudo de Pacejka propôs realizar uma análise da atuação de pneus. Estudo esse realizado durante a parceria entre a *Delf University of Technology* e a *Volvo Car Corp.* Algumas propostas foram inicialmente sugeridas, e diante das dificuldades empregadas em quantificar os resultados foram empregados coeficientes para elaboração das Fórmulas Mágicas e consequentemente modelagem dos pneus. (Bakker, Nyborg e Pacejka, 1987).

Como requisito inicial para descrever as propriedades dos pneus, a Figura A0.1, representa as características do pneu em estado estacionário. As curvas são funções senos para representação inicial, mas posteriormente serão adicionados e reconfigurados os coeficientes para melhor descrição das fórmulas que modelam mais detalhadamente esse comportamento.

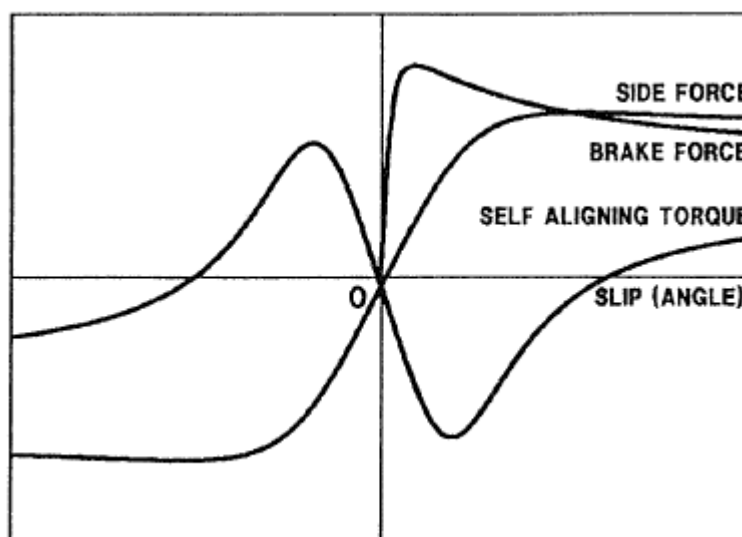


Figura A0.1 – Característica do Pneu em estado estacionário. (Bakker, Pacejka e Lidner, 1989)

No eixo Y tem-se representado a força lateral, torque auto alinhante ou força longitudinal. Especialmente, se em X tem-se o ângulo de deslizamento, Y representa a força lateral ou torque auto alinhante. Quando X representa o deslocamento longitudinal, Y se refere a força

longitudinal. O sistema simplificado pode ser descrito pela Equação 04. (Bakker, Nyborg e Pacejka, 1987).

$$Y = D \cdot \text{sen} (B \cdot X) \quad (04)$$

Onde,

D – Valor de Pico

B – Fator de Rigidez

Em uma modelagem mais básica as curvas características de pneus em um estado estacionário, passam pela origem conforme demonstrado na Figura A0.1, segundo a Equação 04. Já as configurações que levam em consideração perfis mais realistas, as curvas apresentam-se deslocadas horizontal/vertical.

Para o perfil mais realista a influência da direção dos “sulcos, ou fibras” do pneu e a resistência ao rolamento dentre outros, fazem o comportamento das senoides passarem fora da origem, o coeficiente E (fator de curvatura) são afetados pela força lateral. Essa maneira pode ser representada pela Equação 05, e as curvas representadas na Figura A0.2. (Bakker , Pacejka e Lidner, 1989).

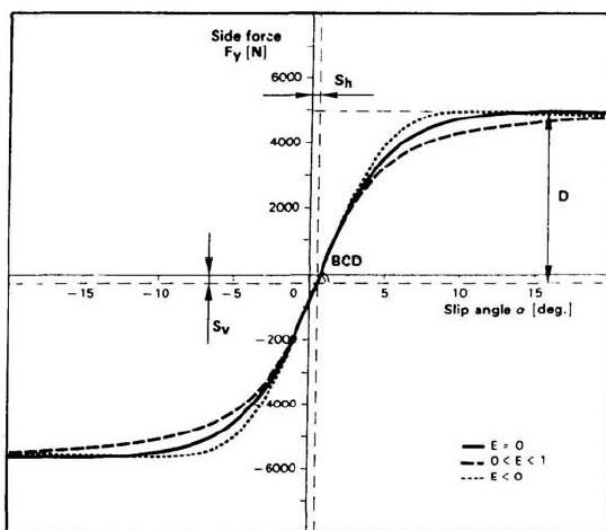


Figura A0.2 – Novos coeficientes que surgem na fórmula do pneu. (Bakker, Pacejka e Lidner, 1989).

$$Y = D \cdot \text{sen} (C \cdot \arctan(B \cdot \phi)) + S_v \quad (05)$$

Onde,

$$\phi = (1 - E) \cdot (X + S_h) + \left(\frac{E}{B}\right) \cdot \arctan(B(X + S_h)) \quad (06)$$

S_h – Deslocamento horizontal

S_v – Deslocamento vertical

C – Fator de Curva

E – Fator de curvatura, influenciado pela força lateral

Segundo Bakker, Nyborg e Pacejka (1987), as Fórmulas Mágicas apresentam variações bem específicas, e essas modificações são alteradas devido a alguns subparâmetros, e esforços F_x , F_y , M_z , respectivamente, força longitudinal, força lateral e o torque auto alinhante, descritos nas Tabelas Tabela A1 e Tabela A2. Os coeficientes fornecidos pelos autores não foram detalhados.

Tabela A1 – Coeficientes para fórmula do pneu com influência de carga. (Bakker, Nyborg e Pacejka, 1987).

Coeficiente para fórmula do pneu com influência de carga								
	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8
F_x	-21,3	1144	496	226	0,069	-0,006	0,056	0,486
F_y	-22,1	1011	1078	1,82	0,208	0,000	-0,354	0,707
M_z	-2,72	-2,28	-1,86	-2,73	0,110	-0,070	0,643	-4,04

Tabela A2 – Coeficiente para fórmula do pneu conectado e com influência do ângulo de cambagem. (Bakker, Nyborg e Pacejka, 1987)

Coeficiente para fórmula do pneu conectado e com influência do ângulo de cambagem					
	a_9	a_{10}	a_{11}	a_{12}	a_{13}
F_x	-	-	-	-	-
F_y	0,028	0,000	14,8	0,022	0,000
M_z	0,015	-0,066	0,945	0,030	0,070

O Fator de Pico representado por D, sendo influenciado pela carga vertical, é dado por.

$$D = a_1 \cdot F_z^2 + a_2 \cdot F_z \quad (07)$$

O produto (BCD) é dado pelas equações 08, 09 e 10, onde.

Para força longitudinal F_x , tem-se:

$$B \cdot C \cdot D = \frac{a_3 \cdot F_z^2 + a_4 \cdot F_z}{e^{(a_5 \cdot F_z)}} \quad (08)$$

Para força lateral F_y , é dado por:

$$B \cdot C \cdot D = a_3 \cdot \text{sen}(a_4 \cdot \arctan(a_5 \cdot F_z)) \cdot (1 - a_{12} \cdot |\gamma|) \quad (09)$$

Para Torque auto alinhante M_z , obtém-se:

$$B \cdot C \cdot D = \frac{a_3 \cdot F_z^2 + a_4 \cdot F_z}{e^{(a_5 \cdot F_z)}} \cdot (1 - a_{12} \cdot |\gamma|) \quad (10)$$

Conforme sugerido por Bakker, Nyborg e Pacejka (1987), o fator de forma (C) assume valores constantes de $C = 1,65$ em força longitudinal, $C = 1,30$ em força lateral e $C = 2,40$ para torque auto alinhante. Dessa forma o fator de rigidez (B) pode ser expresso por:

$$B = \frac{B \cdot C \cdot D}{C \cdot D} \quad (11)$$

O Coeficiente de Curvatura (E), pode ser calculado a partir de:

Para forças longitudinal e forças lateral, tem-se:

$$E = a_6 \cdot F_z^2 + a_7 \cdot F_z + a_8 \quad (12)$$

Para torque auto alinhante o coeficiente (E), é dado por:

$$E = \frac{a_6 \cdot F_z^2 + a_7 \cdot F_z + a_8}{(1 - a_{13} \cdot \gamma)} \quad (13)$$

O deslocamento horizontal (S_h), e o deslocamento vertical (S_v), são calculados a partir das Equações 14 e 15, respectivamente.

$$S_h = a_9 \cdot \gamma \quad (14)$$

$$S_v = (a_{10} \cdot F_z^2 + a_{11} \cdot F_z) \cdot \gamma \quad (15)$$

Equacionamento de Pacejka para o modelo de 1989. (PAC89)

Após o primeiro trabalho sobre modelo de pneus proposto por Pacejka e sua equipe em 1987, realizaram um segundo trabalho em 1989. Alguns assuntos, foram atualizados pelos autores Bakker, Pacejka e Lidner (1989), nesse segundo trabalho. Especificamente, foi ampliado o modelo de forma a considerar o pneu não anisotrópico e reavaliada a influência dos coeficientes para calcular os parâmetros do pneu.

Mesmo com o avanço do trabalho de 1989, o veículo e o pneu ainda estavam sob avaliação no modo de estado estacionário, e esse comportamento pode ser visto na Figura A0.1.

Durante curvas ou frenagens puras, o comportamento pode ser descrito segundo a equação 16.

$$y(x) = D \cdot \text{sen}(C \cdot \arctan \{B \cdot x - E \cdot [(B \cdot x - \arctan(B \cdot x))]\}) \quad (16)$$

Onde,

$$Y(X) = y(x) + S_v \quad (17)$$

$$x = X + S_h \quad (18)$$

A magnitude $Y(X)$, pode representar a força lateral, torque de auto alinhamento ou força de longitudinal, enquanto de a magnitude X representa o ângulo de escorregamento (α) ou o escorregamento longitudinal (k).

Nesse trabalho, também conhecido por PAC 89, o equacionamento com reduzido número de parâmetros mantém um comportamento adequado para as características de força lateral, força longitudinal, bem como torque de auto alinhamento, apresentando curvas com boa característica. (Bakker, Pacejka e Lidner, 1989).

A partir da fórmula mágica (Equação 16) e os respectivos coeficientes dado pelas características de força lateral podem ser definidos.

O fator de pico é expresso por:

$$D_y = u_y \cdot F_z \quad (19)$$

Sendo u_y , o coeficiente de atrito lateral, tem-se:

$$u_y = a_1 \cdot F_z + a_2 \quad (20)$$

O produto compreendido por $B_x \cdot C_x \cdot D_x$ fornece a rigidez ao deslocamento, é expresso por:

$$B_x \cdot C_x \cdot D_x = a_3 \cdot \text{sen} \left(2 \cdot \arctan \left(\frac{F_z}{a_4} \right) \right) \cdot (1 - a_5 \cdot |\gamma|) \quad (21)$$

O coeficiente que representa o fator de curva, é indicada por C , assim tem-se:

$$C = a_0 \quad (22)$$

Análogo a seção anterior, temos que o coeficiente B é definido pela Equação 23.

$$B = \frac{B \cdot C \cdot D}{C \cdot D} \quad (23)$$

O fator de curvatura em função da força lateral, foi elaborada, segundo a seguinte equação:

$$E = a_6 \cdot F_z + a_7 \quad (24)$$

O deslocamento horizontal (S_h), e o deslocamento vertical (S_v), são expressos pelas equações 25 e 26, respectivamente.

$$S_h = a_8 \cdot \gamma + a_9 \cdot F_z + a_7 \quad (25)$$

$$S_v = a_{11} \cdot F_z \cdot \gamma + a_{12} \cdot F_z + a_{13} \quad (26)$$

Com relação a força de frenagem os coeficientes apresentam o equacionamento conforme as equações que vão de 20 a 26.

Tem-se o fator de pico dado por:

$$D_x = u_x \cdot F_z \quad (27)$$

O coeficiente de atrito longitudinal u_y , é elaborado a partir dos subparâmetros de carga dependente do atrito longitudinal (b_1), do nível de atrito longitudinal (b_2) e da força vertical (F_z), obtém-se:

$$u_y = b_1 \cdot F_z + b_2 \quad (28)$$

O produto compreendido por $B \cdot C \cdot D$ fornece a rigidez ao deslocamento, é dado por:

$$B \cdot C \cdot D = (b_3 \cdot F_z^2 + b_4 \cdot F_z) \cdot e^{(-b_5 \cdot F_z)} \quad (29)$$

O coeficiente que representa o fator de curva, é indicada por C , assim tem-se:

$$C = b_0 \quad (30)$$

O fator de rigidez B , é:

$$B = \frac{B \cdot C \cdot D}{C \cdot D} \quad (31)$$

O fator de curvatura em função da força longitudinal, foi elaborada de acordo com a seguinte equação:

$$E = b_6 \cdot F_z^2 + b_7 \cdot F_z + a_8 \quad (32)$$

O deslocamento horizontal (S_h), e o deslocamento vertical (S_v), é expresso pelas equações 33 e 34, respectivamente.

$$S_h = b_9 \cdot F_z + b_{10} \quad (33)$$

$$S_v = 0 \quad (34)$$

Para definir o torque de auto alinhamento, inicialmente calcula-se o coeficiente do fator de pico D_z , como:

$$D_z = c_1 \cdot F_z^2 + c_2 \cdot F_z \quad (35)$$

O coeficiente de rigidez para influência vertical, é dado pelo produto $B \cdot C \cdot D$, com isso tem-se:

$$B_z \cdot C_z \cdot D_z = \frac{c_3 \cdot F_z^2 + c_4 \cdot F_z}{e^{(c_4 \cdot F_z)}} \cdot (1 - c_6 |\gamma|) \quad (36)$$

O fator de forma:

$$C_z = c_0 \quad (37)$$

De maneira análoga ao B_x e ao B_y , o fator de rigidez B_z , é escrito como:

$$B_z = \frac{B_z \cdot C_z \cdot D_z}{C_z \cdot D_z} \quad (38)$$

O fator de curvatura, segundo a seguinte equação 39:

$$E = (c_7 \cdot F_z^2 + c_8 \cdot F_z + c_9) \cdot (1 - c_{10} \cdot |\gamma|) \quad (39)$$

O deslocamento horizontal (S_h), e o deslocamento vertical (S_v), são expressos pelas equações 40e 41, respectivamente.

$$S_h = c_{11} \cdot \gamma + c_{12} \cdot F_z + c_{13} \quad (40)$$

$$S_v = (c_{14} \cdot F_z^2 + c_{15} \cdot F_z) \cdot \gamma + c_{16} \cdot F_z + c_{17} \quad (41)$$

Estimativas para Coeficientes de pneus

O processo de obtenção de parâmetros para modelagem de pneus, normalmente apresenta-se como grande desafio, e trabalhos relacionados ao modelo de pneus de cadeiras de rodas se tornam menos comuns, quando comparados a resultados de pneus aplicados a automóveis. Com isso o trabalho de (Silva, 2011) traz grande contribuição ao modelar os parâmetros de alguns tipos de pneus em diferentes configurações de pisos.

Segundo (Silva, 2011), os parâmetros foram adquiridos conforme os gráficos de força lateral em função do ângulo de escorregamentos, cuja função é atendida pela fórmula mágica.

Dessa forma, os parâmetros B , C , D , E , $(B \cdot C \cdot D)$, S_h e S_v foram substituídos nas equações propostas por Pacejka, obtendo parâmetros de a_0 a a_7 para pneu de propulsão para cadeira de rodas em três condições de pisos, apresentados na Tabela A3.

Tabela A3 – Coeficientes de α_0 a α_7 para diferentes tipos de pisos, utilizando pneu 1 de propulsão. (Silva, 2011).

Coeficientes em função do tipo de Piso (Primeiro tipo de pneu)			
Coeficientes	Sem Piso	Piso Paviflex	Piso de Borracha
a_0	1,567	2	1,1603
a_1	165,07	-78,332	-927,08
a_2	78,81	362,46	812,82
a_3	28,52	-34,3374	-374,57
a_4	0,393	-0,45702	-0,36979
a_5	0	0	0
a_6	4,8929	0,3776	21,4874
a_7	-0,53563	0,96943	-12,146

Depois de avaliar o pneu 1 para diferentes tipos de pisos, (Silva, 2011) realizou um novo teste, apresentando dessa vez pneus diferentes para o mesmo tipo de piso, no caso Paviflex, para comparar a influência das características dos pneus. Os coeficientes obtidos estão apresentados na Tabela A4.

Tabela A4 – Coeficientes para dois tipos de pneus testados. (Silva, 2011).

Coeficientes em função do tipo de pneu (Piso tipo Paviflex)		
Coeficientes	Pneu 1	Pneu Novo
a_0	2	1,7866
a_1	-78,332	-360,9
a_2	362,46	545,52
a_3	-34,3374	-118,23
a_4	-0,45702	-0,235
a_5	0	0
a_6	0,3776	51,16
a_7	0,96943	-9,05

Apêndice B – Tabela com massa dos elementos do modelo virtual

A Tabela B1 apresenta os valores de massa dos elementos do modelo virtual baseado no cálculo pelo MSC.ADAMS®.

Tabela B1 – Tabela com as massas equivalentes da cadeira de rodas, módulo e *Dummy*.

Descrição	Massa	Unidade
<i>Dummy</i>	92,033	kg
Rolo Esquerdo	0,183	kg
Rolo Direito	0,183	kg
Eixo Esquerdo	0,100	kg
Eixo Direito	0,100	kg
Acoplamento Esquerdo	0,272	kg
Acoplamento Direito	0,272	kg
Rodízio Esquerdo	0,481	kg
Rodízio Direito	0,481	kg
Garfo Esquerdo	0,700	kg
Garfo Direito	0,700	kg
Roda Esquerda	2,223	kg
Monobloco	12,757	kg
Roda Direita	2,223	kg
TOTAL	112,710	kg

Apêndice C – Esquema de ligação do Circuito Elétrico e Eletrônico do kit de motorização do protótipo físico da cadeira de rodas.

A Figura C0.1, apresenta o circuito elétrico e eletrônico da montagem do kit de motorização do protótipo físico da cadeira de rodas.

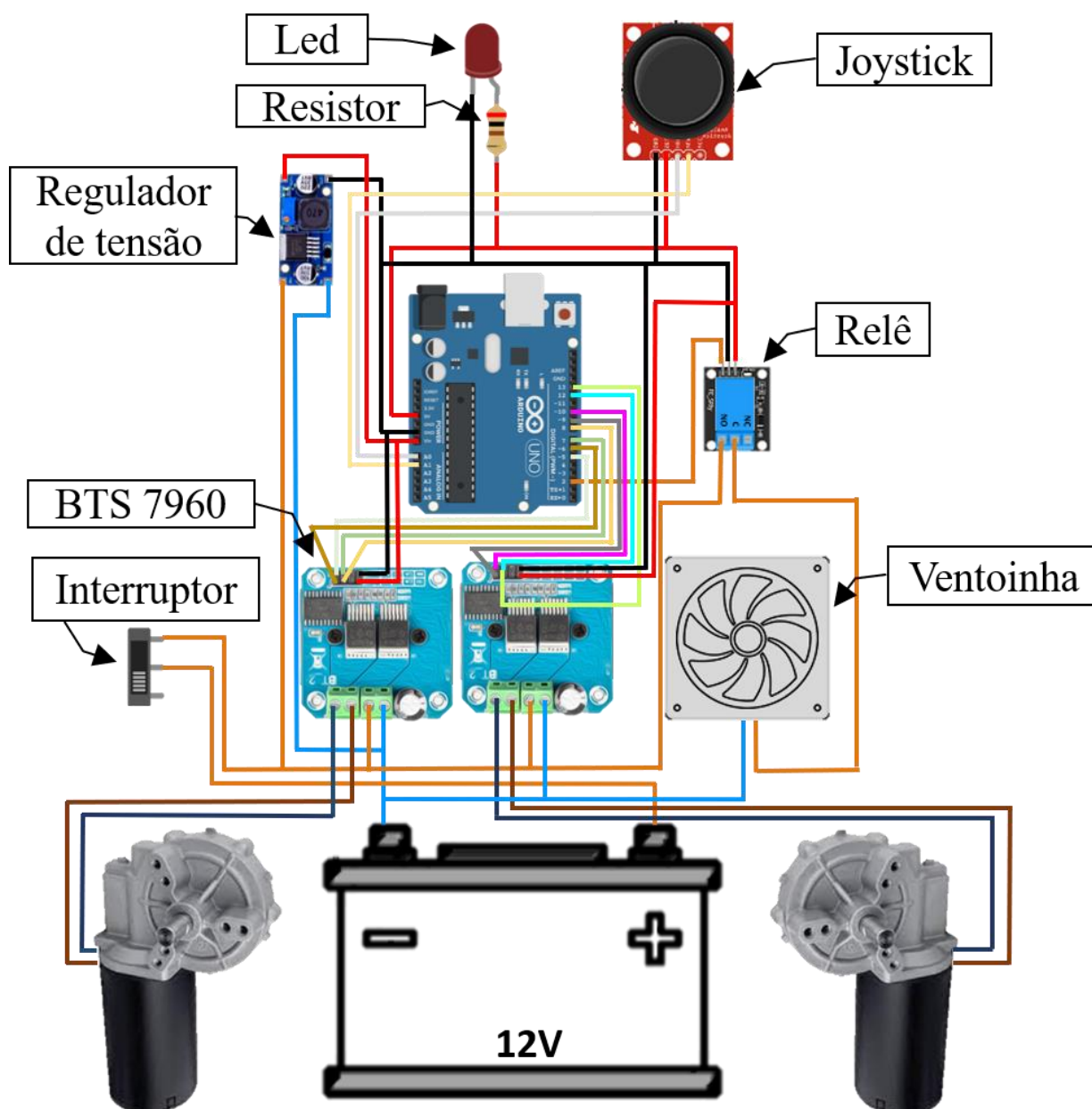


Figura C0.1 – Esquema de ligação elétrica e eletrônica do kit de motorização do protótipo físico da cadeira de rodas.

Apêndice D – Código para controle do kit de motorização do protótipo físico da cadeira de rodas.

```

/*
Programação para controle do protótipo físico da motorização da cadeira de
rodas.
*/

#define RPWM_E 5
#define LPWM_E 6
#define REN_E 7
#define LEN_E 8
int xValue = 0; // To store value of the X axis
int yValue = 0; // To store value of the Y axis
#define RPWM_D 9
#define LPWM_D 10
#define REN_D 12
#define LEN_D 13

int cooler = 2;

#define VRX_PIN A0 // Arduino pin connected to VRX pin
#define VRY_PIN A1 // Arduino pin connected to VRY pin

#define calibracao_x 498
#define calibracao_y 507
#define Range_calibracao 15

int out1_D;
int out2_D;
int out3_D;
int out4_D;
int out1_E;
int out2_E;
int out3_E;
int out4_E;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode(RPWM_E, OUTPUT);
  pinMode(LPWM_E, OUTPUT);
  pinMode(LEN_E, OUTPUT);
  pinMode(REN_E, OUTPUT);
  digitalWrite(REN_E, HIGH);
  digitalWrite(LEN_E, HIGH);
}

```

```

    pinMode(RPWM_D,OUTPUT);
    pinMode(LPWM_D,OUTPUT);
    pinMode(LEN_D,OUTPUT);
    pinMode(REN_D,OUTPUT);
    digitalWrite(REN_D,HIGH);
    digitalWrite(LEN_D,HIGH);

    pinMode(cooler,OUTPUT);
    digitalWrite(cooler,LOW);
}
void loop() {
    // read analog X and Y analog values
    xValue = analogRead(VRX_PIN);
    yValue = analogRead(VRY_PIN);
    Serial.print("X : ");
    Serial.print(xValue);
    Serial.print(" - Y : ");
    Serial.println(yValue);
    delay(100);

    // Frente - Reto
    if ((yValue > (calibracao_y - Range_calibracao) & yValue < (calibracao_y +
Range_calibracao)) & xValue < (calibracao_x - Range_calibracao)){
        digitalWrite(REN_D,HIGH);
        digitalWrite(LEN_D,HIGH);
        out1_D = map(xValue,498,0,0,255);
        analogWrite(RPWM_D,out1_D);
        analogWrite(LPWM_D,0);
        Serial.print("X : ");
        Serial.println(xValue);

        digitalWrite(REN_E,HIGH);
        digitalWrite(LEN_E,HIGH);
        out1_E = map(xValue,498,0,0,255);
        analogWrite(RPWM_E,out1_E);
        analogWrite(LPWM_E,0);
        Serial.print("X : ");
        Serial.println(xValue);
    }
    // Ré - Reto
    else if ((yValue > (calibracao_y - Range_calibracao) & yValue <
(calibracao_y + Range_calibracao)) & xValue > (calibracao_x +
Range_calibracao)){
        digitalWrite(REN_D,HIGH);
        digitalWrite(LEN_D,HIGH);
        out2_D = map(xValue,498,1023,0,255);
        analogWrite(RPWM_D,0);
    }
}

```

```

    analogWrite(LPWM_D,out2_D);
    Serial.print("X : ");
    Serial.println(xValue);

    digitalWrite(REN_E,HIGH);
    digitalWrite(LEN_E,HIGH);
    out2_E = map(xValue,498,1023,0,255);
    analogWrite(RPWM_E,0);
    analogWrite(LPWM_E,out2_E);
    Serial.print("X : ");
    Serial.println(xValue);

}
// Esquerda - Giro
else if ((xValue > (calibracao_x - Range_calibracao) & xValue <
(calibracao_x + Range_calibracao)) & yValue > (calibracao_y +
Range_calibracao)){
    digitalWrite(REN_D,HIGH);
    digitalWrite(LEN_D,HIGH);
    out3_D = map(yValue,498,1023,0,255);
    analogWrite(RPWM_D,0);
    analogWrite(LPWM_D,out3_D);
    Serial.print("Y : ");
    Serial.println(yValue);

    digitalWrite(REN_E,HIGH);
    digitalWrite(LEN_E,HIGH);
    out3_E = map(yValue,498,1023,0,255);
    analogWrite(RPWM_E,out3_E);
    analogWrite(LPWM_E,0);
    Serial.print("Y : ");
    Serial.println(yValue);
}
// Direita - Giro
else if ((xValue > (calibracao_x - Range_calibracao) & xValue <
(calibracao_x + Range_calibracao)) & yValue < (calibracao_y -
Range_calibracao)){
    digitalWrite(REN_D,HIGH);
    digitalWrite(LEN_D,HIGH);
    out3_D = map(yValue,498,0,0,255);
    analogWrite(RPWM_D,out3_D);
    analogWrite(LPWM_D,0);
    Serial.print("Y : ");
    Serial.println(yValue);

    digitalWrite(REN_E,HIGH);
    digitalWrite(LEN_E,HIGH);
    out3_E = map(yValue,498,0,0,255);
    analogWrite(RPWM_E,0);

```

```
    analogWrite(LPWM_E,out3_E);  
    Serial.print("Y : ");  
    Serial.println(yValue);  
}  
  
else {  
    digitalWrite(REN_D,LOW);  
    digitalWrite(LEN_D,LOW);  
    digitalWrite(REN_E,LOW);  
    digitalWrite(LEN_E,LOW);  
    Serial.println("Motores desligados");  
}  
}
```