

Desenvolvimento de plataforma robótica móvel para a área de educação técnica

Antonio Valerio Netto¹

¹DT CNPq, Brasília – Brasil

antonio.valerio@pq.cnpq.br

Abstract. *The article reports the development of a robotic mobile platform for education that has an "open architecture", allowing the user to develop new functionalities. In addition to the development of this platform, the project also aimed to develop the first modules to be used with this structure. The programming environment has features so that it is possible for a researcher, student or company to create accessories (modules) with different applications, with the possibility of adapting the technology to different areas, such as health and safety. The development and justifications related to the part of the battery decks, chassis and mechanical grab are described in detail.*

Resumo. *O artigo relata o desenvolvimento de uma plataforma robótica móvel para educação que possui uma "arquitetura aberta", permitindo ao usuário desenvolver novas funcionalidades. Além do desenvolvimento desta plataforma, o projeto também visou desenvolver os primeiros módulos a serem usados com essa estrutura. O ambiente de programação possui funcionalidades, de modo que é possível que um pesquisador, estudante ou empresa crie acessórios (módulos) com diferentes aplicações, com a possibilidade de adaptar a tecnologia a diferentes áreas, como saúde e segurança. São descritos em detalhes o desenvolvimento e as justificativas relacionadas à parte dos decks de bateria, chassi e garra mecânica.*

1. Introdução

A robótica educacional é a aplicação da tecnologia na área pedagógica, sendo mais um instrumento que oferece aos alunos e professores, a oportunidade de vivenciar experiências semelhantes às que terão na vida real, dando a estes a chance de solucionar problemas mais do que observar formas de solução. A robótica tem grande potencial como ferramenta interdisciplinar, visto que a construção de um novo mecanismo, ou a solução de um novo problema, frequentemente extrapola a sala de aula. Na tentativa natural de buscar uma solução, o aluno questiona professores de outras disciplinas que podem ajudá-lo a encontrar o caminho mais indicado para a solução do seu problema [Wan & Jiang 2005]. A robótica, então, assume o papel de uma ponte que possibilita religar fronteiras anteriormente estabelecidas, agindo como um elemento de coesão dentro do currículo das escolas. As principais vantagens pedagógicas da robótica são [Martyn & Harwin 1999]:

- Desenvolver o raciocínio e a lógica na construção de algoritmos e programas para controle de mecanismos;

- Favorecer a interdisciplinaridade, promovendo a integração de conceitos de áreas como: matemática, física, eletricidade, eletrônica e mecânica;
- Aprimorar a motricidade por meio da execução de trabalhos manuais;
- Permitir testar em um equipamento físico o que aprenderam utilizando na teoria ou em programas “modelo” que simulam o mundo real;
- Transformar a aprendizagem em algo positivo, tornando bastante acessível os princípios de Ciência & Tecnologia aos alunos;
- Estimular a leitura, a exploração e a investigação;
- Preparar o aluno para o trabalho em grupo;
- Estimular o hábito do trabalho organizado, uma vez que desenvolve aspectos ligados ao planejamento, execução e avaliação final de projetos;
- Ajudar na superação de limitações de comunicação, fazendo com que o aluno verbalize seus conhecimentos e suas experiências e desenvolva sua capacidade de argumentar e contra argumentar;
- Desenvolver concentração, disciplina, responsabilidade, persistência e perseverança;
- Estimular a criatividade, tanto no momento de concepção das ideias, como durante o processo de resolução dos problemas;
- Tornar o aluno consciente da ciência na sua vida cotidiana;
- Desenvolver a autossuficiência na busca e obtenção de conhecimentos;
- Gerar habilidades para investigar e resolver problemas concretos.

A robótica educacional é servida por vários produtos de acordo com a faixa etária e do contexto pedagógico que se deseja trabalhar. Existem brinquedos pedagógicos com eletrônica de controle, kits educacionais com foco em alunos do ensino fundamental e ensino médio. Conteúdo didático e competições utilizando kits de montagem robótica e até robôs móveis inteligentes de pequeno porte para o nível técnico e de graduação, que também podem ser aplicados em pesquisas por alunos de pós-graduação [Saerbeck *et al.* 2010][Weinberg & YU 2003]. É importante diferenciar os modelos dos kits e as aplicações para não desestimular os alunos e professores, além de transmitir informações equivocadas das possibilidades da tecnologia, como ferramenta de desenvolvimento educacional ao longo do ciclo acadêmico do aluno que vai desde ensino fundamental até a pós-graduação. Existem kits robóticos para crianças e existem kits robóticos para os futuros engenheiros. Cada um tem seu grau de complexidade e usabilidade para estimular os jovens aprendizes [Miller *et al.* 2008].

O objetivo geral do projeto foi desenvolver uma plataforma robótica móvel, chamada RoboDeck, para área de educação técnica que possuísse uma “arquitetura aberta”, possibilitando que o usuário desenvolva, ele mesmo, novos módulos de aplicação conforme seus próprios interesses. Neste projeto foram desenvolvidos os

primeiros módulos a serem usados com a plataforma robótica. Esses módulos são: sistema de visão embarcado, garra mecânica e *software* de comunicação para teleoperação.

A plataforma é constituída por uma estrutura mecânica que possui interfaces para comunicação com o meio exterior e, internamente, com uma placa mãe com um barramento de expansão. A estrutura mecânica suporta todo o circuito elétrico interno que se comunica com o exterior por meio de várias interfaces onde serão conectados os acessórios como garra mecânica (manipulação), mecanismos de movimentação (locomoção), visão, sensores, etc. Nestas interfaces são definidas: uma fixação mecânica, um conector, um barramento de comunicação, a função de cada linha do barramento e seus protocolos de comunicação.

Internamente, a *motherboard* contém um processador com todos os periféricos necessários para o seu funcionamento, um *kernel* e um barramento que permite a instalação de placas de expansão (módulos) para implementação dos acessórios. Além disso, o ambiente de programação comporta funcionalidades, de forma que é possível, para um pesquisador, estudante ou empresa, criar acessórios (módulos) com diferentes aplicações, com possibilidade, inclusive, de adaptação da tecnologia para diversas áreas, como, médica (*homecare*) e de segurança. O fato de se utilizar a Internet para teleoperação, isto é, controlar e programar o robô remotamente permite criar uma gama de aplicações. Como por exemplo a sua utilização como ferramenta de ensino à distância em escolas que não dispõem de recursos para construir um laboratório de robótica. Estas escolas podem adquirir apenas o *software* e utilizar pela Internet os robôs disponíveis (Laboratório de Robótica à Distância).

2. Visão geral do sistema robótico

Foram definidas as especificações da plataforma robótica como um ponto de partida. Como a aparência, robustez, segurança, usabilidade, além de não ter aparência de brinquedo e ou de um robô militar. As especificações técnicas definiram os limites de cada parte da plataforma robótica:

- Autonomia diferenciada = 4 à 8h de funcionamento com recarga rápida;
- Precisão / repetibilidade nos movimentos / boa mobilidade;
- Apto para se locomover em ambientes fechados (indoor): pisos lisos;
- Ambientes externos (outdoor): terra batida e grama baixa;
- Subir rampa máxima de 30°;
- Peso para movimentação (Módulo Braço/Pinça): 400gr;
- Peso máximo da plataforma robótica: 15kg;
- Dimensões básicas: 600mm x 400mm x 350mm.
- Foram estudados dois modelos de robôs como benchmarking:
- K-Team = modelo Khepera/Koala. Site: <http://www.k-team.com>
- ECA = modelo PEMD 1000. Site: <http://www.eca.fr>

A plataforma projetada é composta pelas seguintes partes: Sistema de alimentação, Sistema de locomoção, Chassi, Carenagem, Sistemas de sensores, Sistema de atuadores, Módulos lógicos e garra mecânica. Os módulos lógicos são formados por: controle da locomoção; comunicação de controle, núcleo robótico, alta performance, controlador, protocolo de comunicação e visão embarcada.

Cada módulo representa um equipamento eletrônico com certa autonomia de processamento e que possua independência lógica em relação ao sistema. Participaram da realização desta concepção especialistas em eletrônica de controle, eletrônica digital, telecomunicação e engenharia de *software*. O objetivo deste esforço conjunto foi o de definir os módulos lógicos do robô e as tecnologias a serem utilizadas em cada módulo e nas interfaces entre eles. A Figura 1 resume o resultado deste trabalho.

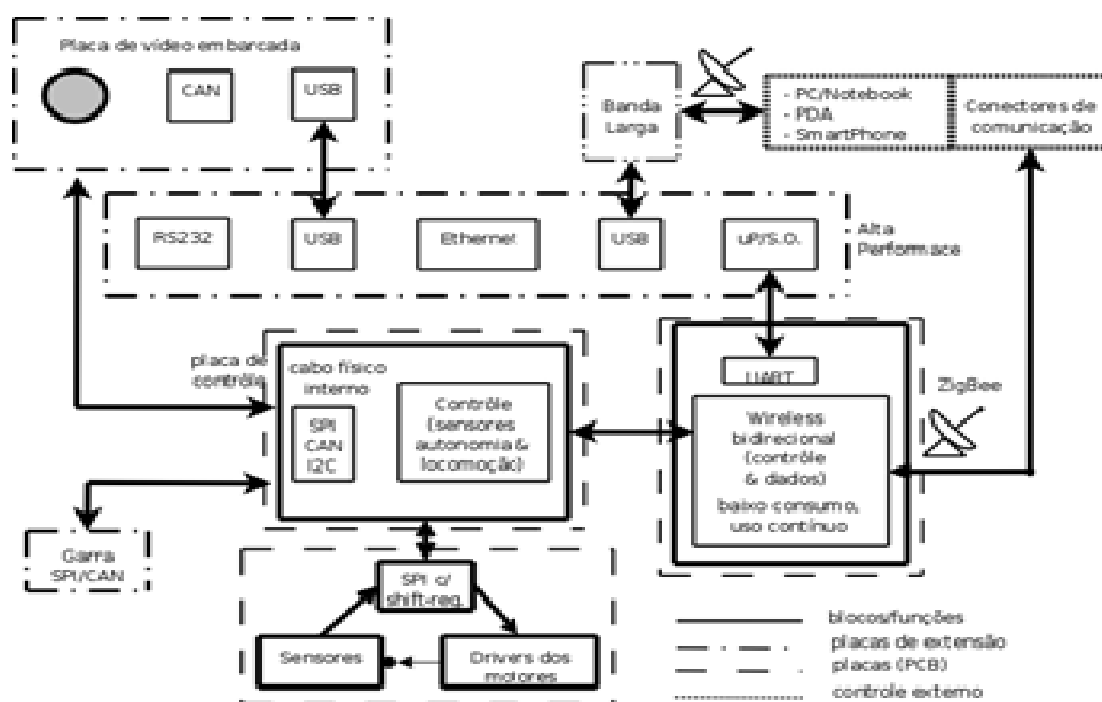


Figura 1. Módulos lógicos que compõem a plataforma robótica

Os módulos do sistema podem ser agrupados em duas diferentes categorias: módulos básicos que implementam as funcionalidades essenciais do robô e módulos de extensão que não são necessários para o funcionamento básico do robô, mas quando utilizados agregam funcionalidades extras. A seguir são descritos os módulos dentro de suas respectivas categorias.

Os módulos básicos abrangem todos os módulos essenciais ao funcionamento do robô. As placas eletrônicas que os compõem são fisicamente atreladas à estrutura física do robô. É importante ressaltar que tendo apenas os módulos básicos o robô atua como um “escravo”, executando passo-a-passo os comandos que lhe são fornecidos. Os

módulos básicos não preveem qualquer controle de alto nível ou inter-relação entre informações e controle dos periféricos do robô. Este tipo de controle é previsto com a utilização dos módulos da categoria de extensão. Os módulos básicos são:

- Módulo de controle da locomoção: Implementa interface digital (SPI) para o controle digital dos motores e leitura dos sensores necessários à gerência da locomoção. Também é responsável por gerir de forma autônoma os drivers de potência dos motores e seus mecanismos de retenção.
- Módulo de comunicação: Responsável por receber os comandos que controlarão o robô. Há duas interfaces para a recepção de comandos por este módulo: física (UART) e remota (zigbee). Independentemente da origem do comando, o módulo é responsável por traduzi-lo para um protocolo conhecido do “núcleo robótico” que finalmente executará o comando. No caso de comandos remotos este módulo é responsável, também, por determinar a identificação do robô e situá-lo na rede de comunicações (zigbee). Outra tarefa do módulo é decidir a quem (qual “master”) o robô obedecerá. É importante salientar que esse módulo possui um microcontrolador que garante sua autonomia em relação aos outros módulos do robô.
- Módulo do núcleo robótico: Possui o microcontrolador principal do robô responsável por gerenciar o controle digital básico de todos os periféricos do robô. Este módulo recebe comandos do módulo de comunicação e cuida para que estes comandos sejam executados pelos periféricos (locomoção e periféricos adicionais). Também tem a função de, a partir de comandos do módulo de comunicação, ler e repassar os estados dos periféricos ao solicitador.

Os módulos de extensão não são necessários ao funcionamento básico do robô, no entanto, ampliam suas capacidades. Duas foram as capacidades projetadas a serem estendidas: inteligência/alta performance e periféricos. Outro ponto importante é que estes módulos foram projetados para serem facilmente personalizados ou até mesmo substituídos por módulos desenvolvidos pelo próprio usuário. Como consequência, a execução física (*hardware*) destes módulos passa a ter menos importância para o projeto do que a definição dos protocolos de comunicação (*hardware* e *software*) que os integra aos módulos básicos e do *software* que os gerencia. A seguir são descritos os módulos de extensão do ponto de vista do robô:

- Alta performance: *Hardware* embarcado, fisicamente conectado ao robô por meio de uma porta serial (UART), capaz de suportar um sistema operacional para que os aplicativos que nele rodarão sejam independentes do *hardware* em questão. O papel desse módulo é o de executar as atividades que envolvam grande poder de processamento ou comunicação sem onerar o núcleo robótico que estará ocupado com a gerência básica do robô. Como exemplo, tem-se a captura e processamento de imagens. Outra função desse módulo é a de permitir a agregação de novas tecnologias ao robô por meio de interfaces padrão (ex: USB, WI-FI e *Bluetooth*). Uma terceira função é a

autonomia do robô. Esse módulo deve ser capaz de ser programado com uma aplicação de controle do robô que o torne independente do robô de controles externos e o faça agir como um “peer” e não mais como um “escravo”.

- Periféricos adicionais: Os módulos periféricos representam *hardware* que podem ser fisicamente adicionados ao sistema. Do ponto de vista eletrônico/computacional estes periféricos são vistos como módulos capazes de se comunicar utilizando SPI (*hardware*) e seguindo um protocolo de *software* a ser definido ao longo do desenvolvimento do projeto, visto que alguns tipos de periféricos deverão ser suportados.

3. Desenvolvimento da plataforma de hardware

Relacionada às questões da plataforma de *hardware* um dos principais desafios do projeto foi desenvolver um sistema de geração de energia com grande autonomia e naturalmente com custos compatíveis. Diversas possibilidades foram analisadas até encontrar a mais satisfatória, considerando o binômio autonomia/custos, e naturalmente, as disponibilidades de mercado. Evitou-se criar soluções que incorporem situações não padronizadas ou não consolidadas tecnicamente.

Foi realizada uma pesquisa extensa buscando soluções em “baterias + eficientes” disponíveis no mercado capazes de atender no quesito autonomia. Para este estudo, foi realizada uma modelagem simplificada do sistema de locomoção. Considerando um sistema automotivo convencional, com locomoção via torque interno. O movimento nas rodas apresenta características de rolamento com uma percentagem 10-20% de escorregamento. Neste contexto, para que ocorra o movimento é necessária uma adesão no solo e o coeficiente de atrito é chamado particularmente de coeficiente de adesão. Considerando um sistema automotivo convencional, com várias características físicas:

$$W = \text{Força Peso} \quad \implies \quad W = m \cdot g$$

$$F_n = \text{Força Normal} \quad \implies \quad F_n = W = m \cdot g$$

$$F_a = \text{Força de Aderência} \quad \implies \quad F_a = \mu \cdot F_n = \mu \cdot m \cdot g$$

Aplicando a equação do movimento, considerando uma aceleração pequena ($\sim 0,1 \text{m/s}^2$ máxima), pode-se simplificar o sistema e a força propulsora necessária será aquela apenas para vencer a força de aderência. A Figura 2 mostra as forças aplicadas no veículo.

$$F_p = \text{Força Propulsora} \quad \implies \quad F_p = F_a = \mu \cdot m \cdot g$$

$$F_r = \text{Força resultante} \quad \implies \quad F_r = m \cdot a = F_p - F_a$$

$$\text{Considerando } a \sim 0 \quad \implies \quad F_p = F_a = \mu \cdot m \cdot g$$

Considerando as grandezas de velocidade e potência necessária:

$$\text{Potência} = \text{Pot} = F_p \cdot v \quad \implies \quad \text{Pot} = \mu \cdot m \cdot g \cdot v$$

$$\text{Coeficiente de aderência} = \mu = 0,6$$

$$\text{Velocidade} = v = 0,4 \text{ m/s}$$

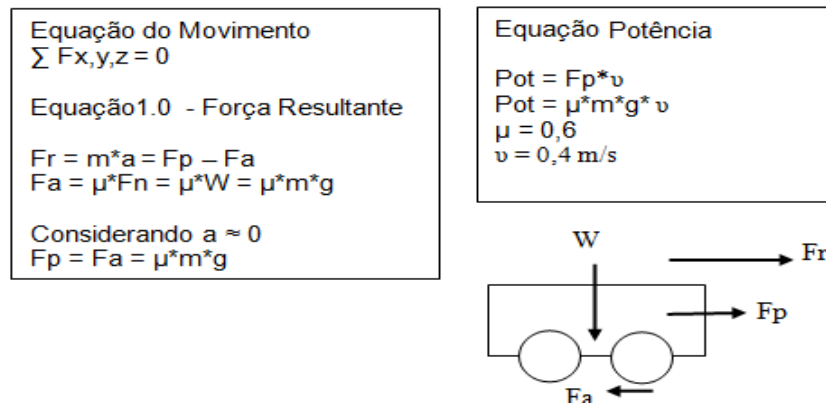


Figura 2. Esquema das forças aplicadas no veículo

Foi realizada uma pesquisa na gama de baterias disponíveis no mercado considerando basicamente o fator: $F = \text{Amperagem/Peso}$. Para a aplicação as grandezas características de interesse em uma bateria são:

- Dimensões \implies as mais compactas
- Voltagem \implies 12 ou 24V
- Capacidade = Amperagem*Hora \implies Maior possível
- Fator $F = \text{Amperagem / Peso} \implies$ Maior possível
- Preço compatível com orçamento.

Considerando as possibilidades de fonte de energia que garantirão uma boa autonomia com custos competitivos, optou-se por avançar o projeto com a alternativa *pack* de baterias recarregáveis nas opções: *Thunder Power RC* (Li Poly) e *LBC 2800*. A Figura 3 mostra a distribuição das baterias no chassi.

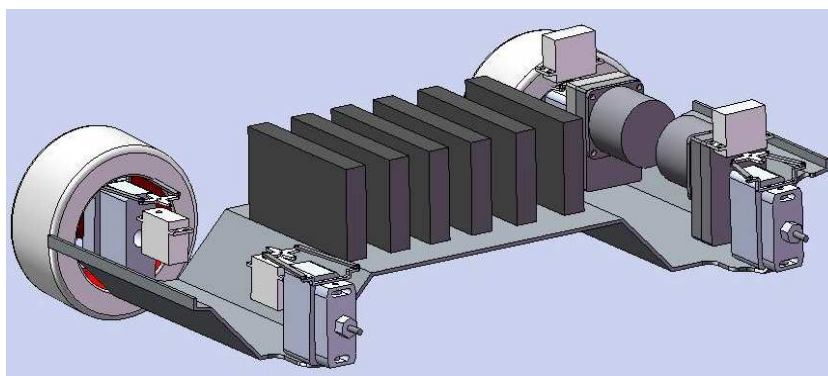


Figura 3. Distribuição das baterias no chassi

3.1. Sistema de locomoção

O sistema de locomoção foi conceituado considerando os aspectos de desempenho e precisão nos movimentos. Considerando a necessidade de maior autonomia, este item foi estudado com cuidado. A conceituação deste item foi de fundamental importância. Existe uma diferença conceitual importante no comportamento da Roda:

- Força tipo reboque - Condição de Arraste;
- Força autopropulsão - Momento torsor na roda, característica de veículos com autopropulsão;

Observando a Figura 4 verificamos que na condição reboque, a roda gira em movimento de rolamento puro = não existe movimento relativo entre o solo e a roda.

$$v = \omega * r$$

Na condição autopropulsão (M=torque interno), existe um movimento combinado de rolamento e escorregamento = existe movimento relativo entre o solo e a roda

$$v \neq \omega * r$$

Pode-se dizer que para que haja movimento de rolamento na roda, é necessário que a força transmitida ao solo (FRS) seja $\leq \mu * W$, que é a força normal aplicada na roda. Pode-se dizer também que se a força transmitida ao solo (FRS) for $< \mu * W$, então aparecerá o movimento de escorregamento.

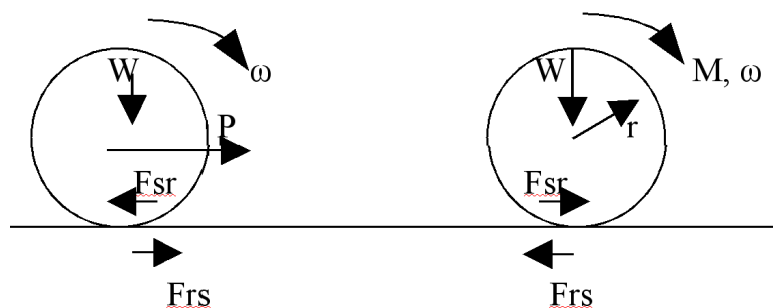


Figura 4. Representação das forças no caso de reboque e autopropulsão

Onde:

v – Velocidade Linear
M – Momento Interno

ω – Velocidade Angular
P – Força de Reboque

r – Raio Roda
Frs – Força Rooda-Solo

W – Força Peso
Fsr – Força Solo-Roda

Para uma matriz roda elástica (pneumático) em solo rígido pode-se dizer que a roda apresentará um movimento combinado de rolamento + escorregamento com

percentagem de escorregamento da ordem de 10% a 20%. Considerando as características particulares de uma roda elástico coeficiente de atrito roda-solo passará a ser chamado de “coeficiente de adesão μ ”.

$$F_{sr} = \mu * W = \mu * m * g$$

Outras situações foram observadas como os aspetos de adesão ao solo, escorregamento em curvas (forças laterais), pistas inclinadas, precisão dos movimentos. É importante considerar algumas características construtivas que possibilitem a criação do efeito “torque auto-alinhante”.

- Toe-In: Ângulo de convergência que provoca forças laterais, reduzindo a trepidação das rodas – considerado o valor de $1,5^\circ$ (Figura 5 e Figura 6).
- Camber: Ângulo da roda contribui para o torque auto-alinhante – considerado $1,5^\circ$.
- Caster: Ângulo principal para se conseguir o efeito do torque auto-alinhante considerado também $1,5^\circ$.

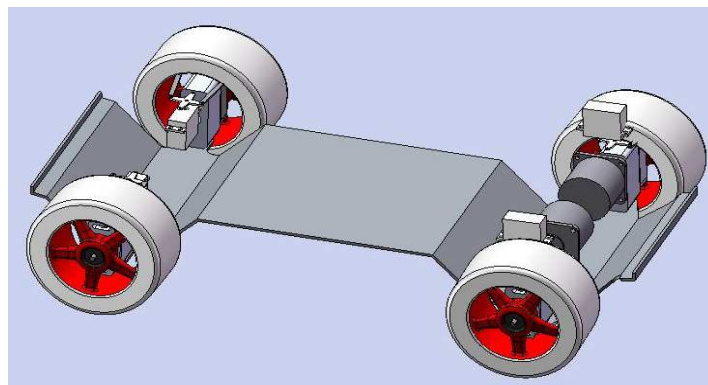


Figura 5. Montagem no Chassi

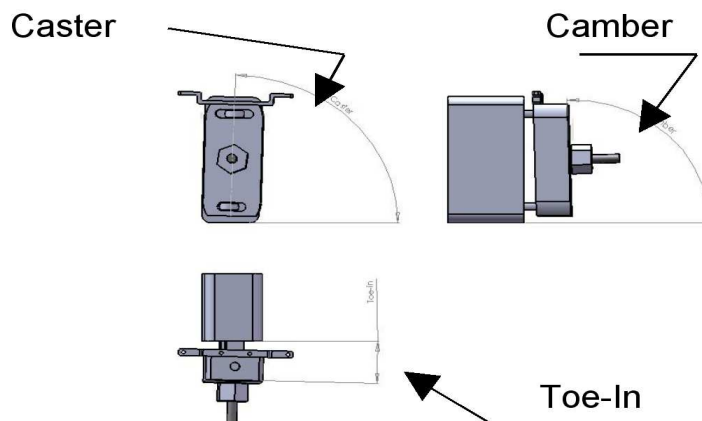


Figura 6. Representação dos ângulos das rodas

O robô foi conceituado para se locomover principalmente em ambientes “indoor”, pisos com pouca irregularidade, no máximo terra batida, rampa máxima de 30°. Além disso, considerando o conceito de robustez, peso do produto estimado (~15kg) e disponibilidades standards de mercado, definiu-se por uma roda larga de grande diâmetro com uma dureza intermediária, não muito macia, reduzindo o coeficiente de adesão solo. Optou-se por trabalhar com rodas nas bitolas comerciais: #4” a #6”. Com relação à definição da quantidade de rodas, inicialmente, trabalhou-se com a opção de seis rodas objetivando dar ao robô uma mobilidade em terrenos irregulares = “efeito lagarta”.

Esta proposta apresentava, no entanto, alguns pontos negativos: mobilidade lateral ruim; difícil condição de arraste das rodas quando na alteração na direção do movimento; dificuldade de manobras e sistema de transmissão mais complexo e mais caro. Neste contexto, a quantidade de quatro rodas se mostrou mais adequado considerando que o sistema de movimentação é mais simples e mais barato. Um robô com seis rodas seria necessário à utilização de um sistema de correias sincronizadas.

A precisão nos movimentos também foi um tema de bastante discussão no projeto. Mecanicamente, a opção de esterçamento (manobra) via servo-motores se mostrou atrativa, principalmente pela possibilidade de giro 360°, quando colocados nas quatro rodas. Ainda sobre o sistema de locomoção, algumas configurações de acionamento foram analisadas:

- Configuração mecânica com tração independente em quatro rodas = cada roda sendo acionado por 1 motor elétrico + 1 redutor = alto custo.
- Configuração mecânica com tração independente em 2 rodas = cada roda sendo acionado por 1 motor elétrico, com ação direta na roda = baixo custo, mas peso excessivo direto nas rodas comprometendo o Sistema Chassi.
- Configuração mecânica com tração independente em duas rodas = cada roda sendo acionada por 1 motor elétrico + 1 redutor + junta homocinética = melhor opção custo/benefício + funcionamento adequado.

A configuração mecânica com tração independente em duas rodas + função esterçamento (manobra) das quatro rodas via servo-motores independentes se apresentou como alternativa interessante considerando:

- Maior precisão nos movimentos = possibilidade de giro de 360° (servos nas quatro rodas);
- Manobras mais simples;
- Custo menor = utilização de apenas dois conjuntos = motor elétrico + redutor + junta homocinética.

Considerando informações descritas anteriormente, definiu-se pela seguinte configuração para o sistema de locomoção:

- Fonte de Energia = Baterias recarregáveis;

- Fonte Propulsora = Sistema com dois moto-redutores + juntas homocinéticas. Serão utilizados dois moto-redutores independentes, com juntas homocinéticas acopladas às rodas com tração traseira = Lado oposto à Pinça;
- Manobras = Função “giro” com quatro servo-motores independente, um em cada roda, possibilitando o giro de 360° do robô;
- Quatro rodas de #6”.

3.2. Estudo dinâmico

A Figura 7 ilustra o modelo em multicorpos desenvolvido em ambiente ADAMS/View®. O modelo foi dividido em quatro partes: Motor que é responsável pelo movimento do robô; Servo-motor que é responsável pelo esterçamento; Chassi que é a estrutura de fixação das partes (compreende a garra também); Pneus e pista.

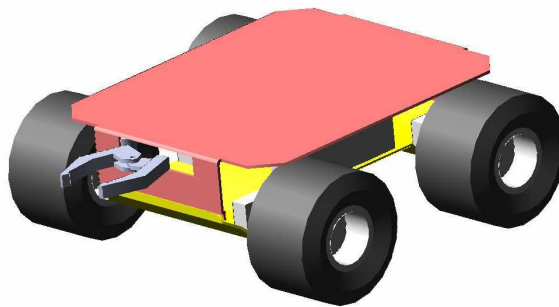


Figura 7. Modelo do Solid do robô em ambiente ADAMS/View

Para o estudo da dinâmica do robô foram realizadas as seguintes análises:

- Análise de raio constante: avaliação do comportamento lateral do robô e dimensionamento dos servos motores;
- Análise de subida de rampa: avaliação do comportamento longitudinal do robô e dimensionamento dos motores;
- Análise de passagem em obstáculos: avaliação do comportamento vertical do robô.

Foram analisados dois motores com torques diferentes. Foram utilizados dois motores, dianteiros, com massa de 250g cada, e a relação de redução utilizada é de 25:1. O modelo de servo utilizado é o S3003 da marca Futaba. Suas características, de acordo com o fabricante, são:

- Torque nominal: 44.4 oz-in (3.2 Kgf.cm) @ 4.8V / 56.8 oz-in (4.1 Kgf.cm) @ 6V;
- Velocidade: 0.23 sec/60° @ 4.8V / 0.19 sec/60° @ 6 V;
- Massa: 1.3 oz (370 g);

Foi aplicado um ângulo de esterço na junta de revolução (que representa o pivotamento). Os torques derivados da movimentação foram então medidos para o correto dimensionamento dos servos. O ângulo de esterço de projeto utilizado é de 30°, podendo ser alterado (para mais ou para menor) de acordo com os resultados das análises.

O modelo matemático de pneu utilizado foi o Fiala (ADAMS User's Manual). Este modelo de pneu analítico é bastante simples e funcional, o que permite um bom e rápido ajuste, pois poucos parâmetros são necessários para o seu funcionamento. Algumas hipóteses foram assumidas em sua modelagem:

- Área de contato do pneu (*footprint*) é considerada retangular;
- A pressão está uniformemente distribuída através da área de contato;
- Não são consideradas as relaxações do pneu;

Apesar de não considerar variações no ângulo de câmber da roda, o modelo é bastante robusto, simulando desde o comportamento do pneu em seu estado de deformação elástica até o deslizamento completo. A pista utilizada foi a *mdi_2d_flat.rdf*.

Para o desenvolvimento do controlador de trajetória do robô foram fornecidas as matrizes de estado A, a matriz de controle B e a matriz de saída C. A matriz D é a matriz de realimentação.

$$\dot{x} = [A]x + [B]u$$
$$y = [C]x + [D]u$$

Para o desenvolvimento do controlador de trajetória do robô foram fornecidas as matrizes de estado A, a matriz de controle B e a matriz de saída C. A matriz D é a matriz de realimentação. A linearização do modelo no software Adams foi realizada para quatro pontos de operação, relativo a quatro atitudes do robô (0°, 90°, 180° e 270°), como pode ser visto na Figura 8. Esse modelo linearizado foi importado para o ambiente do software Matlab/Simulink para a sintetização do controlador.

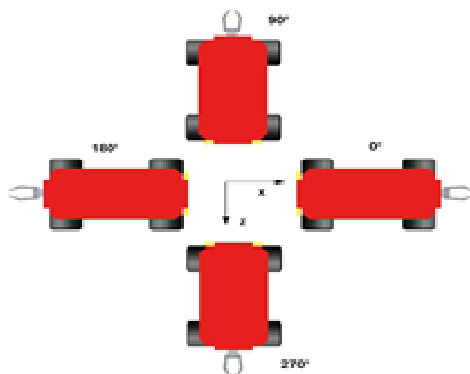


Figura 8. Posições do robô para a linearização e geração das matrizes

Com relação às formulações das forças no Pneu Fiala. Os estudos abrangeram os seguintes tipos de forças: força normal da pista no pneu, força longitudinal, força lateral, momento de resistência ao rolamento, momento de alinhamento e suavização das forças transientes iniciais. A força normal que uma pista exerce em um pneu na região de contato, utilizando o sistema de coordenadas SAE (+Z para baixo) é sempre negativa (apontada para cima). A força normal é:

$$F_z = \min(0.0, \{F_{zk} + F_{zc}\})$$

onde:

- F_{zk} é a força normal devido à rigidez vertical do pneu;
- F_{zc} é a força normal devido ao amortecimento vertical do pneu;
- $F_{zk} = - \text{rigidez vertical} \times S_{pen}$
- $F_{zc} = - \text{amortecimento vertical} \times V_{pen}$

Em vez da rigidez vertical linear do pneu, existe também uma deflexão arbitrária do pneu – a curva de carga pode ser definida no arquivo de propriedade do pneu, na seção [DEFLECTION_LOAD_CURVE]. Se uma seção chamada [DEFLECTION_LOAD_CURVE] existir, os dados da deflexão da carga apontam para uma spline cúbica - e é realizada uma extrapolação para o cálculo da força vertical do pneu. Note que você deve especificar a rigidez vertical [VERTICAL_STIFFNESS] no arquivo de propriedade do pneu, mas ela não tem nenhuma função.

A força longitudinal depende da força vertical (F_z), do coeficiente de atrito (U), o *slip ratio* longitudinal (S_s), e o *slip angle* (Alpha). O coeficiente de atrito depende dos coeficientes estáticos (U_{MAX}) e dinâmico (U_{MIN}) e o *slip ratio* detalhado ($S_s\text{Alpha}$).

U_{MAX} especifica o coeficiente de atrito pneu/pista sem escorregamento e representa o coeficiente de atrito estático. Este é a intercessão em Y da curva do coeficiente de atrito versus escorregamento. Note que este valor máximo não é possível de ser obtido, uma vez que sempre há escorregamento na *footprint* (área de contato). Esse valor é utilizado, juntamente com o U_{MIN} , para definir uma relação linear entre atrito versus escorregamento. U_{MAX} será, geralmente, maior que U_{MIN} . U_{MIN} especifica o coeficiente de atrito pneu/pista para o caso de escorregamento total e representa o coeficiente de atrito de escorregamento. Este é o coeficiente de atrito para 100% de escorregamento, ou escorregamento puro. Esse parâmetro é utilizado juntamente com o U_{MAZ} para definir uma relação linear entre o atrito e o escorregamento.

O atrito detalhado ($S_s\text{Alpha}$):

$$S_s\text{Alpha} = \left(S_s^2 + \tan^2(\text{Alpha}) \right)^{1/2}$$

O valor do coeficiente de atrito (U):

$$U = U_{\max} - (U_{\max} - U_{\min}) \times S_s \alpha$$

O Fiala define um escorregamento longitudinal crítico (S_{critical}):

$$S_{\text{critical}} = \left| \frac{U \times F_z}{(2 \times \text{CSLIP})} \right|$$

Este é o valor do escorregamento longitudinal no qual o pneu está escorregando.

Caso 1. Condição de Deformação Elástica: $|S_s| < S_{\text{critical}}$

$$F_x = -\text{CSLIP} \times S_s$$

Caso 2. Condição de Escorregamento Completo: $|S_s| > S_{\text{critical}}$

$$F_x = -\text{sign}(S_s)(F_{x1} - F_{x2})$$

onde:

$$F_{x1} = U \times F_z$$

$$F_{x2} = \left| \frac{(U \times F_z)^2}{(4 \times |S_s| \times \text{CSLIP})} \right|$$

Assim como a força longitudinal, a força lateral depende da força vertical (F_z) e do coeficiente de atrito que está atuando no momento (U). Também similar ao cálculo da força longitudinal, o Fiala define um escorregamento lateral crítico (α_{critical}):

$$\alpha_{\text{critical}} = \arctan \left(\frac{3 \times U \times |F_z|}{\text{CALPHA}} \right)$$

O pico da força lateral é igual a $U \times |F_z|$ quando o *slip angle* (α) se iguala ao *slip angle* crítico (α_{critical}).

Caso 1. Condição de Deformação Elástica: $|\alpha| \leq \alpha_{\text{critical}}$

$$F_y = -U \times |F_z| \times (1 - H^3) \times \text{sign}(\alpha)$$

onde:

$$H = 1 - \frac{\text{CALPHA} \times |\tan(\alpha)|}{3 \times U \times |F_z|} \quad H = 1 - \frac{\text{CALPHA} \times |\tan(\alpha)|}{3 \times U \times |F_z|}$$

Caso 2. Condição de escorregamento: $|\alpha| > \alpha_{\text{critical}}$

$$F_y = -U|F_z|\text{sign}(\alpha)$$

Quando o pneu rola para frente (sentido horário): $T_y = -\text{rolling_resistance} * F_z$

Quando o pneu rola para trás (sentido anti-horário): $T_y = \text{rolling_resistance} * F_z$

Momento de Alinhamento

Caso 1. Condição de Deformação Elástica: $|\text{Alpha}| \leq \text{Alpha_critical}$
 $M_z = U \times |F_z| \times \text{WIDTH} \times (1-H) \times H^3 \times \text{sign}(\text{Alpha})$

onde:

$$H = 1 - \frac{C_{\text{ALPHA}} \times |\tan(\text{Alpha})|}{3 \times U \times |F_z|}$$

Caso 2. Condição de Escorregamento Completo: $|\text{Alpha}| > \text{Alpha_critical}$

$M_z = 0.0$

ADAMS/Tire pode minimizar as forças iniciais transientes do pneu nos primeiros 0.1 segundos de simulação. As forças longitudinal e lateral, e o torque alinhante são multiplicados por uma função degrau do tempo de terceira ordem.

Força Longitudinal: $F_{\text{Lon}} = S * F_{\text{Lon}}$

Força Lateral: $F_{\text{Lat}} = S * F_{\text{Lat}}$

Torque Alinhante: $M_z = S * M_z$

O parâmetro $[USE_MODE]$, no arquivo de propriedade do pneu, permite que a suavização seja habilitada ou desabilitada:

1. $USE_MODE = 1$, suavização desabilitada;
2. $USE_MODE = 2$, suavização habilitada.

3.3. Desenvolvimento do modelo matemático analítico

O modelo matemático analítico de sete graus de liberdade do robô desenvolvido foi utilizado para o desenvolvimento de um simulador para a determinação da trajetória do robô. O modelo simplificado de veículo, com sete graus de liberdade, pode ser visto na Figura 9.

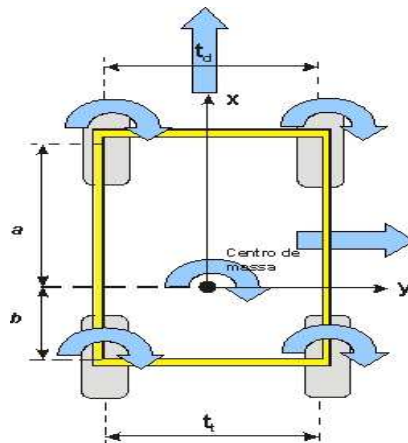


Figura 9. Modelo de sete graus de liberdade do robô

As variáveis de movimento que descrevem a atitude do modelo de sete graus de liberdade do veículo são: ângulos de esterçamento das rodas dianteira e traseira, deslocamento lateral, deslocamento longitudinal, velocidade em guinada (em torno do eixo z do veículo). A correta representação do comportamento do pneu é de suma importância no modelo do robô. Dois efeitos do pneu são importantes na modelagem: a rigidez vertical e a rigidez em curva. A rigidez em curva do pneu é que gera as forças laterais para esterçar o robô e, conseqüentemente, permitir que o robô siga uma trajetória em curva.

Para representar o efeito da alteração da rigidez em curva do pneu com o carregamento lateral há diversos modelos na literatura que representam esse fenômeno [Dugoff *et al.* 1970] [Pacejka & Bakker 1991] [Ellis 1994]. Deve-se notar que foi necessário incluir o modelo analítico a ser desenvolvido que é não linear e que irá incluir as não linearidades do pneu. O pneu é responsável pelo robô fazer curvas, acelerar (pois ele é que transmite as forças) e, portanto, é o elemento mais importante da dinâmica do robô com relação à manobrabilidade (dinâmica lateral e longitudinal). O modelo linearizado como o próprio nome diz é linear e não incluir essa dinâmica do pneu e é válido em torno de um ponto de operação.

O modelo utilizando no presente trabalho é baseado no modelo de Pacejka & Bakker (1991). Baseado em dados da literatura, foi assumido que para ângulos de deriva de até 5° do pneu, o comportamento da curva da rigidez em curva do pneu é linear para uma dada força normal. Isto é, o modelo de rigidez em curva do pneumático será em função da carga normal, assumindo que os ângulos de deriva não ultrapassarão o valor de 5° no pneu. A equação de Pacejka para a rigidez em curva do pneu é:

$$C_{\alpha} = \frac{a_3 \sin[2 \arctan(F_z / (a_4 / 2 * \alpha))]}{a_5 \alpha^2 - a_6 \alpha + a_7}$$

O máximo valor da rigidez em curva será a_3 para uma força normal $F_z = a_4$. O gráfico da Figura 10 mostra o comportamento da rigidez em curva do pneu com o aumento da carga normal segundo equação acima.

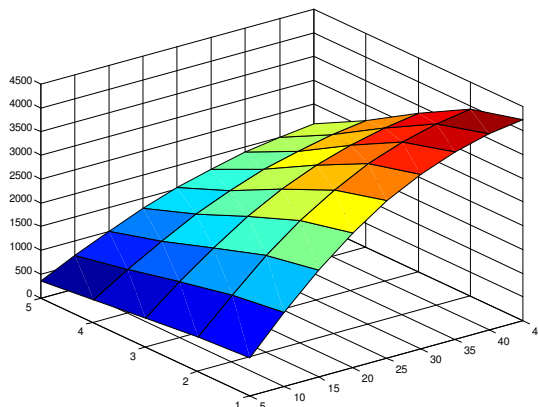


Figura 10. Variação da rigidez em curva do pneu com o aumento da carga normal e do ângulo de deriva do pneu

4. Projeto do chassi e da garra mecânica

Considerando que esta plataforma deve atingir um público estudantil, como por exemplo, escolas técnicas que irão manuseá-lo, desmontá-lo, agregar modificações, participação em competições; o conceito robustez foi tratado como elemento importante. Buscou-se dar um aspecto de resistência física, formas encorpadas, volume, não ser um robô "leve", que ao ser utilizado ou manuseado tenha a sensação de peso, materiais com espessuras adicionais, aspecto reforçado, etc.

Na mesma linha de robustez, o Chassi também foi desenvolvido como elemento estrutural importante no projeto. Considerando os vários elementos de locomoção, um Chassi em aço com vincos diversos, garantindo maior resistência mecânica ao conjunto, foi a alternativa definida. A opção por *pack* de baterias recarregáveis contribuiu para consolidar este conceito de produto "pesado", aliado ao design final, rodas grandes, chassi metálico e carenagem com sobre espessura, garantiram o aspecto de robustez objetivado. Foi concebida uma distribuição das funções do produto em diversos níveis verticais de forma mais adequada:

- Nível I – Fontes de Energia = Baterias = maior peso = maior estabilidade;
- Nível I – Mecanismos de movimentação = sistema mecânico + motores;
- Nível I – Módulo garra – Garra Frontal Tipo Mandíbula;
- Nível II – Inteligência e Elementos de Potência;
- Nível III – Topo = Plataforma Universal para agregar os Módulos: Visão + Comunicação + Opcional cliente.

Como resultado geral, chegaram-se as seguintes definições:

- Chassi em aço espessura 2mm, com desenho (vincos) que aumentem sua resistência mecânica;

- Garra frontal em aço tipo Mandíbula;
- Divisão intermediária em alumínio espessura 1,2mm, com vincos de reforço;
- Carenagem em poliestireno de alto impacto (PSAI) moldado, espessura 4mm.

A Figura 11 mostra as partes do robô em varias posições.

O projeto visa desenvolver um modelo conceitual para um robô com função educacional, ou seja, sua função é ser parte do contexto de escolas, universidades e instituições de ensino que precisem do equipamento para que seus alunos possam desenvolver programas e interfaces que conversem e comandem o robô a desenvolver ações variadas. Alunos da Computação, Mecatrônica, das Engenharias Mecânica e Elétrica, ou mesmo, cursos técnicos poderão utilizar essa vantagem tecnológica.

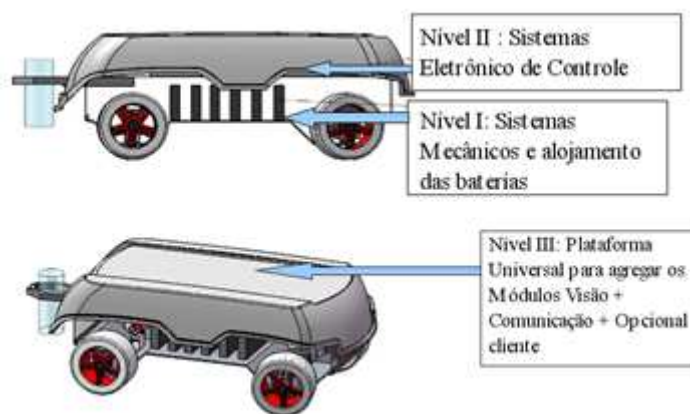


Figura 11. Robô mostrando os níveis I, II e III

O projeto foi dividido em quatro fases: Projeto Informacional, Projeto Conceitual, Projeto Preliminar e Projeto Detalhado e Produtivo. Foi adotada a prática de *brainstorming* multidisciplinar, com a participação de equipe de quatro *designers* industriais e seis engenheiros de diversas áreas. Foram realizadas reuniões, onde foram discutidos diversos aspectos do projeto em relação às áreas do conhecimento representadas, as diretrizes e objetivos. Foram utilizadas técnicas de pensamento divergente, matrizes de decisão, *role-playing*, entre outras, para desenvolver o conceito a ponto de se transformar em um conjunto de especificações que permitiu construir e testar um protótipo funcional.

4.1. Projeto informacional e conceitual

Relacionada à fase de projeto informacional foi realizada a aquisição de toda uma gama de informações sobre o tema em questão e sua posterior interpretação. Os procedimentos de projeto recaem, principalmente, no levantamento junto aos usuários finais, das necessidades e desejos a serem atendidos pelo projeto, além das

características do processo produtivo e suas restrições. Estas necessidades são analisadas e então transformadas em especificações técnicas a serem seguidas pelo projeto.

Nesta fase foi preenchido o documento denominado “*briefing*”, que contém informações dos objetivos do produto, restrições, entre outros, e as considerações iniciais da equipe de *design*. A pesquisa e análise de similares têm a função de agrupar informações que sirvam de referência e ponto de partida para o desenvolvimento das características e funções do equipamento. O conteúdo é basicamente composto por imagens coletadas na Internet. O objetivo pré-determinado foi gerar a percepção de um robô de alta tecnologia, de fácil operação e manutenção, que represente para os usuários vantagem tecnológica durante seu aprendizado.

Com relação aos requisitos, foram analisadas características funcionais de *hardware* e Interface Homem-Máquina (IHM) onde foram detectadas importantes ações a serem realizadas. A primeira é a característica que se pode associar a um porta-aviões, portanto, deve existir um “deck” (superfície lisa e ampla), nessa superfície podem ser instalados de forma livre, equipamentos como braços mecânicos, câmeras Wi-Fi ou qualquer outro dispositivo que seja necessário. Os conceitos podem ser desenvolvidos com seis ou quatro rodas. Devem existir três níveis na estrutura básica do robô (1. Mecânica, 2. PC01, 3. PC03 – Interface Externa). O robô móvel deve ser capaz de subir e transpor obstáculos com até 40°, para cima e para baixo. Neste caso se deve ficar atento para o ângulo de ataque frontal. O robô deve girar em torno do próprio centro.

Na fase do projeto conceitual foi proposto o conceito a ser adotado pelo robô. Foi realizada, uma síntese da estrutura de funções a ser desempenhada pelo mesmo, a busca de princípios de solução para cada uma dessas funções, a subsequente proposição de alternativas de projeto e, finalizando, a seleção daquelas que possuam uma maior concordância com as necessidades do usuário. Após análise da equipe especializada em dinâmica de automóveis, um laudo foi apresentado e um novo conceito para o modelo foi adotado quatro rodas, cada uma com giro de amplitude de 20° (aproximadamente), tração (motor elétrico) nas duas rodas frontais, como mostrado nas Figura 12 e Figura 13.

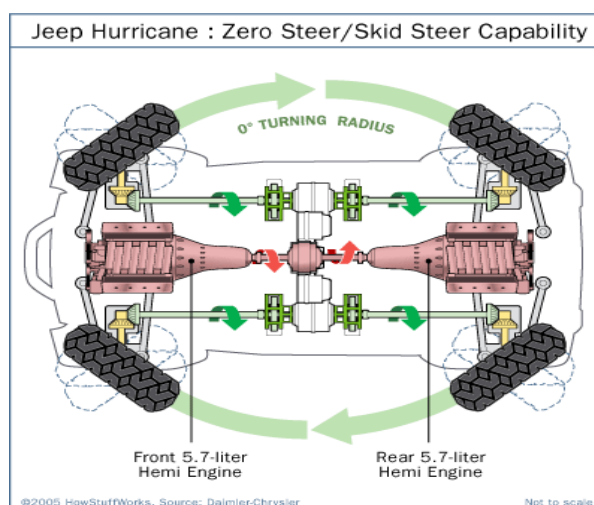


Figura 12. Carro mostrando as quatro rodas com esterço

A figura 14 apresenta a versão final da carenagem seguindo as especificações da equipe de engenharia. O projeto de *design* foi concluído com êxito. Todos os requisitos de funcionalidades foram atendidos.

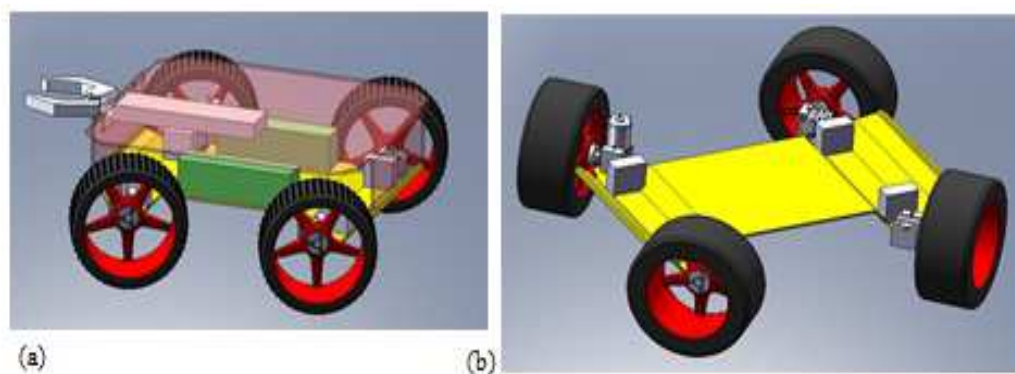


Figura 13. (a) Modelo inicial prevendo a instalação da garra. (b) Modelo demonstra conceito escolhido e sua capacidade de girar sobre o próprio centro. Característica essencial para um robô

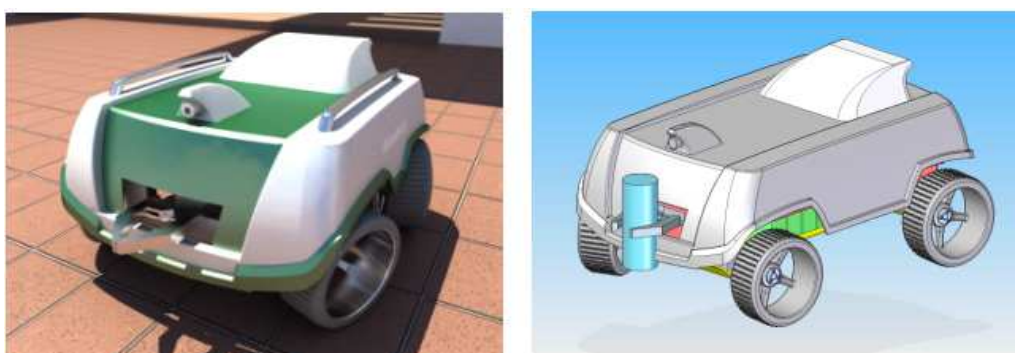


Figura 14. Versão final da carenagem com módulos, garra, câmera e comunicação Wi-Fi

4.2. Garra mecânica

O módulo garra foi configurado como uma *feature*. Foi necessário considerar os aspectos de simplicidade e custos deste módulo. Inicialmente, com o desenvolvimento do conceito “Força de Pressão” – Energia via fluido comprimido, isto é, o módulo seria acionado pneumaticamente, por micro válvulas, microcontroladores, etc. No entanto, descartou-se esta ideia por questões econômicas – custo alto do sistema. Optou-se por utilizar um acionamento da garra por micromotor. Considerando as condições de projeto: Peso a ser movimentado = 400gr máximo; Produto sem movimentação durante a operação da garra “acoplar – desacoplar” - redução de energia; Sistema construtivo tipo rampa para levantar/abaixar o peso; e garra robusta. O resultado final foi à escolha de uma garra frontal tipo mandíbula (Figura 15).

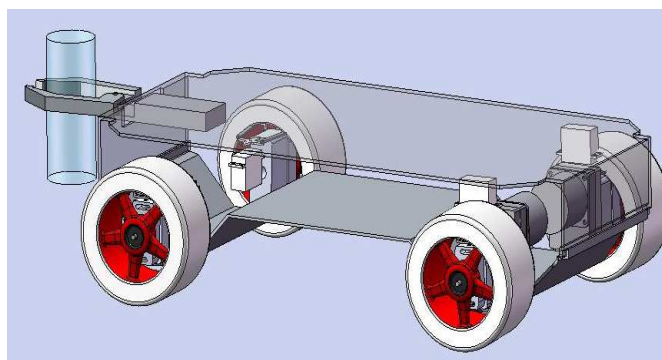


Figura 15. Robô mostrando a posição da garra mecânica

5. Considerações finais

Os resultados práticos com o protótipo demonstram que o projeto teve êxito em seu desenvolvimento com um todo. No caso deste projeto, todas as restrições foram atribuídas às características mobilidade, mecânicas e de autonomia das baterias. Mesmo assim a equipe de *Design* preocupou-se em desenvolver o melhor layout possível em relação à distribuição dos componentes internos e externos, eliminando prováveis problemas de equilíbrio do robô em movimento (centro de gravidade). A partir da análise do conjunto de informações adquiridas, foram definidas as diretrizes do projeto: Ergonomia; Interface de uso inteligível; Estrutura Sólida e Robusta; Acesso fácil para manutenção e Plataforma ou “Deck” externo. É possível observar a solução final na página: www.xbot.com.br/educacional/robodeck/

O *briefing* de design industrial foi preenchido e entregue a equipe de Designers, sendo uma das peças fundamentais na elaboração das diretrizes. Foi realizada uma extensa pesquisa de similares e tendências relacionadas à área de robótica, com o objetivo de conhecer o estado-da-arte, observar princípios de soluções, lacunas e tendências. Alguns problemas e dúvidas surgiram referentes ao conceito do robô e tiveram que ser resolvidos com o aumento da equipe técnica. Inicialmente a ideia era utilizar seis rodas. Porém, nenhum dos integrantes das equipes de *Design* ou Engenharia soube especificar as distâncias mínimas e máximas para os entre - eixos e se era melhor utilizar seis ou quatro rodas. Esta dúvida gerou a necessidade de contratar uma empresa especialista em dinâmica e multicorpos. Com isto foi possível realizar os testes de dinâmica (mecânica automotiva) para entregar uma resposta definitiva, que no caso foi o uso de quatro rodas.

Agradecimentos

Agradecimento ao PIPE (programa de inovação em pequenas empresas) da FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) e ao CNPq por meio do seu programa RHAE (Programa de Formação de Recursos Humanos em Áreas Estratégicas) e DT (Produtividade em Desenvolvimento Tecnológico e Extensão Inovadora).

Referências

Dugoff, H.; Fancher, P.S.; Segel, L. (1970). An analysis of tires properties and their influence on vehicle dynamics performance. SAE Transactions, 700377.

- Ellis, J. R. (1994). *Vehicle handling dynamics*. London: Mechanical Engineering Publications Limited, ISBN 0 85298 885 0.
- Martyn, D. K.; Harwin, K. D. (1999). Robots in the classroom-tools for accessible education. *Assistive technology on the threshold of the new millennium*, v. 6, p. 448.
- Miller, D. P.; Nourbakhsh, I. R.; Siegwart, R. (2008). Robots for education. In: *Springer handbook of robotics*. Springer Berlin Heidelberg, p. 1283-1301.
- Pacejka, H. B.; Bakker, E. (1991). The magic formula tyre model. In: *1st International Colloquium on Tyre Models for Vehicle Dynamics Analysis*, Delft, The Netherlands October 21-22.
- Saerbeck, M. et al. (2010). Expressive robots in education: varying the degree of social supportive behavior of a robotic tutor. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. ACM, p. 1613-1622.
- Wan, Y.; Jiang, G. (2005). On Robot-based Education and Innovation Ability Training for College Students. *Journal of Electrical & Electronic Engineering Education*, v. 4, p. 001.
- Weinberg, J. B.; YU, X. (2003). Robotics in education: Low-cost platforms for teaching integrated systems. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, v. 10, n. 2, p. 4-6.