

# CONSTRUÇÃO DE UM PROTÓTIPO DE UM VEÍCULO AUTO-EQUILIBRANTE

*Aluno: Gabriel Lyo Torige  
Orientador: Aurélio Tergolina Salton*

## **Resumo**

Este trabalho teve como objetivo o projeto e desenvolvimento de um protótipo de um veículo auto-equilibrante elétrico de duas rodas baseado no princípio do pêndulo invertido. Ele tenta manter um ângulo de 0 graus em relação a vertical em todos os momentos e serve para utilização como plataforma para estudo e aplicação de sistemas de controle. A estrutura mecânica, o projeto eletrônico e sua construção, assim como o algoritmo para que o protótipo proposto se equilibre foram projetados. A implementação eletrônica consiste da utilização de um acelerômetro e um giroscópio como sensores para captura da inclinação do veículo, módulos para processamento e controle e dois motores elétricos para a realização dos movimentos. Para validação do protótipo foi desenvolvido um algoritmo implementado em Arduino para a aquisição dos dados dos sensores utilizados e um Filtro de Kalman para fusão dos seus sinais. Por último foi implementado um método de controle no modelo real para que o veículo se auto-equilibre. O protótipo finalizado demonstra o funcionamento das técnicas aplicadas e abre oportunidade para o estudo de outros sistemas de controle e filtragem de dados para que o veículo se auto-equilibre.

**Palavras-chave:** veículo auto-equilibrante; Arduino; Filtro de Kalman; acelerômetro; giroscópio.

# CONSTRUCTION OF A SELF-BALANCING VEHICLE PROTOTYPE

*Student: Gabriel Lyo Torige  
Professor: Aurélio Tergolina Salton*

## **Abstract**

This paper aimed as objective the design and development of an electric two wheels self-balancing vehicle prototype based on the inverted pendulum principle. It attempts to keep an angle of 0 degrees relative to the vertical at all times and serves as a studying platform for application of control systems. The mechanical structure, electronics design and construction, as well as the self-balancing algorithm for the proposed prototype were developed. The electronics implementation consists of an accelerometer and a gyroscope as sensors for capturing the vehicle inclination, processing modules for control and two electric motors for movement. To validate the prototype an algorithm was developed and implemented in Arduino to acquire the sensors data and a Kalman Filter to fuse the signals. Finally a control method was implemented in the real model to achieve self-balancing. The finished prototype demonstrates the operation of the applied techniques and opens new opportunities to study other control systems and data filtering methods to apply and self-balance the vehicle.

**Key-words:** self-balancing vehicle; Arduino; Kalman Filter; accelerometer; gyroscope.

## 1. INTRODUÇÃO

Com o avanço tecnológico dos últimos anos, pode-se perceber a introdução progressiva da robótica em nosso cotidiano. Exemplos com alto índice de aplicação de sistemas robotizados são a indústria automotiva assim como veículos e sistemas automatizados.

Na área de robótica móvel existem os veículos auto-equilibrantes, que são caracterizados pela habilidade de se manterem em equilíbrio em apenas duas rodas e girar sobre o próprio eixo. Possuem como princípio de funcionamento o equilíbrio do operador. Através de sensores inerciais o sistema é capaz de perceber as variações da sua posição angular conforme se projeta para frente ou para trás. Na tentativa de se manter em constante equilíbrio na vertical, o veículo avança automaticamente de acordo com a sua inclinação.

Devido a sua grande flexibilidade de movimentação, intuitividade de operação e tamanho compacto os veículos auto-equilibrantes podem ser utilizados em diversas aplicações como o transporte de pessoas e movimentação de carga.

Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um protótipo de um veículo auto-equilibrante de duas rodas baseado no modelo do pêndulo invertido. Após a conclusão servirá como uma plataforma para teste de captura e filtragem de dados de sensores analógicos e sistemas de controle para auto-estabilização do veículo.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1. VEÍCULO BASEADO NO PÊNDULO INVERTIDO

O veículo baseado no pêndulo invertido estudado é similar a combinação de sistemas como a um carro-pêndulo. Porém diferente do sistema tradicional de pêndulo invertido, o veículo abordado não se limita ao movimento planar em duas dimensões e os motores que tracionam as rodas são montados diretamente na estrutura do pêndulo.

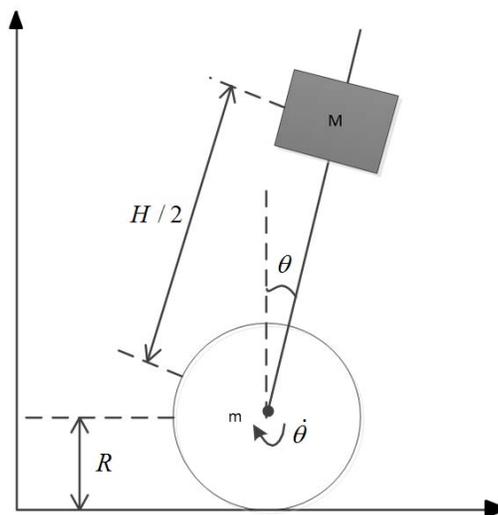
Um dos veículos baseados neste princípio mais famosos é o *Segway® Personal Transporter* (figura 1), que foi lançado em 2001 e desenvolvido por Dean Kamen. O seu desenvolvimento teve início em 1990 após Kamen, constrangido ter observado um homem de cadeira de rodas tentar subir em uma calçada. (SEGWAY BRASIL, 2013)

Ele utiliza uma Unidade de Medição Inercial (UMI) constituída por giroscópios e sensores de nível para detectar alterações de inclinação da plataforma. O controlador e os motores que são situados na base atuam para mantê-la sempre na horizontal. Para deslocar-se para frente ou para trás, deve-se inclinar o veículo ligeiramente para a direção desejada. Os motores então movimentam as rodas para frente ou para trás conforme necessário para manter o equilíbrio ou impulsionar o veículo. (CARDOSO; VERA, 2012)



**Figura 1:** *Segway Personal Transporter*

Várias pesquisas do modelo dinâmico deste tipo de veículo foram realizadas nos últimos anos, como pode ser observado em (YEONGYUN, 2011). A maioria se baseia nas equações dinâmicas de Newton-Euler ou Lagrange para obter o modelo dinâmico do sistema. O modelo simplificado do veículo pode ser verificado na figura 2:



**Figura 2:** Modelo do veículo estudado

O modelo cinemático do veículo pode ser descrito pelo seguinte vetor de estados:

$$x = \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \\ X \end{bmatrix} \quad (1)$$

onde  $\theta$  é o seu ângulo de inclinação,  $\dot{\theta}$  a sua velocidade angular e  $X$  o seu deslocamento. Pode-se observar que tão importante quanto o desenvolvimento do projeto de controle, é necessária uma ótima aquisição da posição do veículo em relação ao meio.

## 2.2. NEVEGAÇÃO INERCIAL

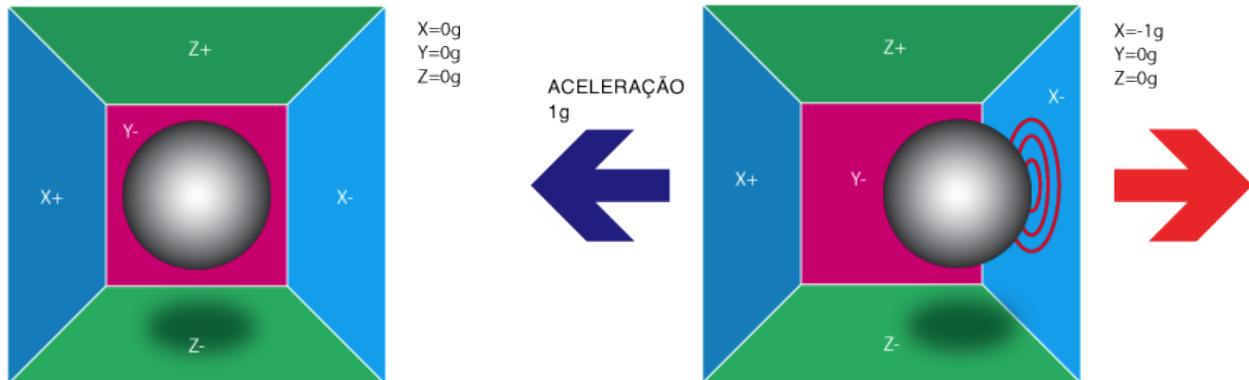
Navegação Inercial é uma maneira pela qual se adquirem informações sobre a posição e velocidade de um veículo com relação a uma referência por meio de informações obtidas por sensores como acelerômetros e giroscópios. O sistema de navegação inercial mede as acelerações e velocidades angulares de um corpo, o que torna possível o cálculo das mudanças de posição e atitude. Um UMI é um instrumento de medição, que pode ser constituída por acelerômetros e giroscópios que permite determinar a velocidade angular do corpo onde está presente. (BARSHAN; DURRANT-WHYTE, 1995)

Desenvolver um sistema de navegação inercial não é simples. Além da necessidade do alinhamento dos acelerômetros e giroscópios ser precisa, a leitura dos sensores é, devido a sua natureza, contaminada por ruído e dos próprios erros que se acumulam com o passar do tempo. Para eliminar de forma eficiente as distorções contidas nos sinais dos sensores, há a necessidade da utilização de algoritmos de fusão sensorial, que permitem combinar dados obtidos de diferentes sensores em uma estimativa estatisticamente ótima.(BARSHAN; DURRANT-WHYTE, 1995)

### 2.2.1. ACELERÔMETRO

O acelerômetro é um dispositivo eletromecânico que mede a força de aceleração inercial. Esta pode ser estática, como a força constante da gravidade, ou dinâmica, como a causada pelo movimento ou vibração do acelerômetro. Através da medição da quantidade de aceleração estática em relação a gravidade, é possível determinar o ângulo que o dispositivo está inclinado em relação a Terra. (DIMENSION ENGINEERING, 2013)

A figura 3 representa o acelerômetro quando em estado estacionário e em movimento. Quando não há força gravitacional aplicada o mesmo se mantém imóvel e não retorna força gravitacional. Porém quando é aplicada por exemplo uma força de 1g na direção positiva do seu eixo X o mesmo vai apresentar uma medição de 1g na direção negativa do eixo X.



**Figura 3:** Acelerômetro em repouso e com força de 1g aplicada no eixo X

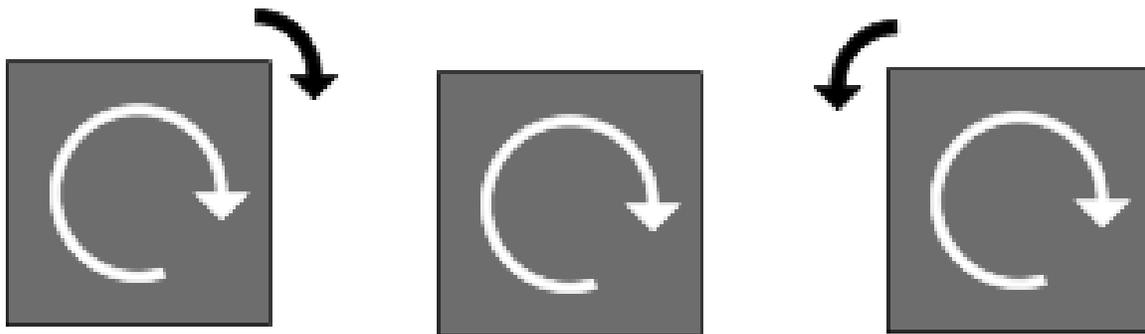
O problema é que este dispositivo é muito suscetível a acelerações devido a movimentações ou vibrações e portanto as suas leituras contém uma quantidade considerável de ruído que não é simples de ser removida. Estas características são comuns a todos os acelerômetros, então um método mais sofisticado é necessário para se obter uma medição da inclinação da plataforma mais acurada. Para corrigir estes problemas, é necessária a inserção de outras variáveis no sistema. (SABATELLI ET AL., 2011)

### 2.2.2. GIROSCÓPIO

O giroscópio é um dispositivo que mede a taxa de variação angular que se refere a quão rápido um objeto está girando em graus por segundo e pode ser considerada como a derivada da posição angular.

Uma característica única do giroscópio é que ele possui um ponto médio de repouso, também conhecido como *bias*. Este valor é retornado quando o giroscópio está em repouso e deve ser corrigido a cada medição para se obter um valor preciso da velocidade medida. Quando o sensor é inclinado, o valor da taxa de variação angular altera e rapidamente retorna ao ponto de repouso. Outro problema comum a estes dispositivos é a tendência a um comportamento chamado drift quando em repouso, onde sinal de saída tende a acumular erro ao longo do tempo.

A figura 4 representa o giroscópio em três estados: o primeiro o representa sendo rotacionado em sentido horário, e portanto obtendo uma leitura positiva. O segundo o representa na sua posição de ponto médio e o terceiro representa o giroscópio sendo rotacionado em sentido anti-horário e portanto obtendo uma leitura negativa.



**Figura 4:** Três estados do giroscópio

Ao contrário do acelerômetro, o giroscópio é altamente imune a falta de movimento angular, e portanto menos suscetível a vibrações. Mas como a medição angular é cumulativa, uma característica deste dispositivo é que quando em repouso, o sinal de saída tende a acumular erro ao longo do tempo. Devido a isto o giroscópio também não é confiável para ser utilizado sozinho como um sensor de inclinação.

### **2.2.3. FILTRO DE KALMAN**

Para resolver o problema de medições com ruído e limitações de ambos os sensores, existe a possibilidade de se aplicar uma técnica chamada fusão de sensores. Ela consiste da combinação das medições do acelerômetro e do giroscópio de maneira que se aproveite os pontos fortes dos dois sensores e no fim, obter uma resposta mais precisa do ângulo comparada a utilização de somente um deles. Como o acelerômetro pode fornecer o ângulo precisamente quando não há aceleração e o giroscópio medições precisas do ângulo em espaços curtos de tempo, estas características se complementam e os dois sensores são candidatos ideais para a aplicação da fusão de sensores.

Na maioria dos casos, os sistemas baseados em navegação inercial realizam a fusão das informações dos sensores utilizando Filtro de Kalman. Alguns exemplos do uso dessa técnica podem ser encontrados em várias referências como a aplicação em (WALCHKO;

MASON 2002) e (FERDINANDO ET AL., 2012).

Rudolf Kalman publicou na década de 1960 o artigo intitulado "*A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems*" e nele descreve a solução para problemas de filtragem de dados discretos em um sistema linear. O Filtro de Kalman é um conjunto de equações matemáticas que proporcionam um método computacional eficiente para estimar o estado de um processo, de um modo que minimiza o erro quadrático médio.

Ele aborda o problema genérico de tentar o estimar o estado  $x \in \mathbb{R}^n$  de um tempo discreto em um processo controlado que é regido pela equação diferencial estocástica

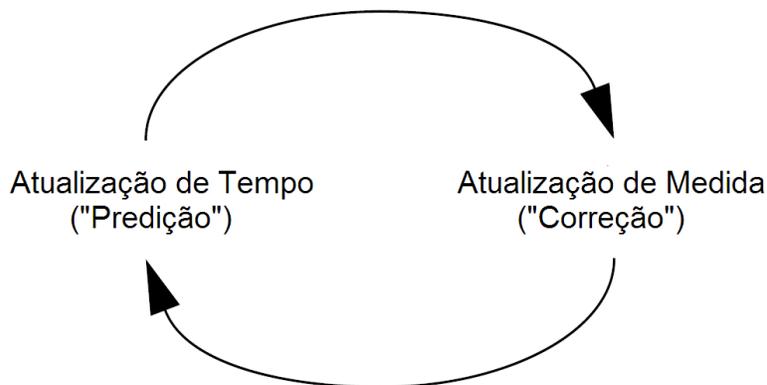
$$x_k = Ax_{k-1} + Bu_{k-1} + w_{k-1}, \quad (2)$$

com uma medição  $z \in \mathbb{R}^n$

$$z_k = Hx_k + vk. \quad (3)$$

onde as variáveis aleatórias  $w_k$  e  $v_k$  representam os ruídos de estado e das medidas. Assume-se que ele são independentes um do outro, brancos e com distribuição normal.

O algoritmo de estimação é similar ao de um sistema preditor-corretor, conforme a figura 5:



**Figura 5:** ciclo do Filtro de Kalman

A atualização das equações de tempo projeta o estado atual estimado à frente do tempo. A atualização das equações da medida ajusta o estado projetado com uma medição no tempo atual. (BISHOP; WELCH, 2001)

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a construção do protótipo do veículo auto-equilibrante foram realizadas etapas seguindo uma sequência conforme a estrutura analítica de projeto abaixo:

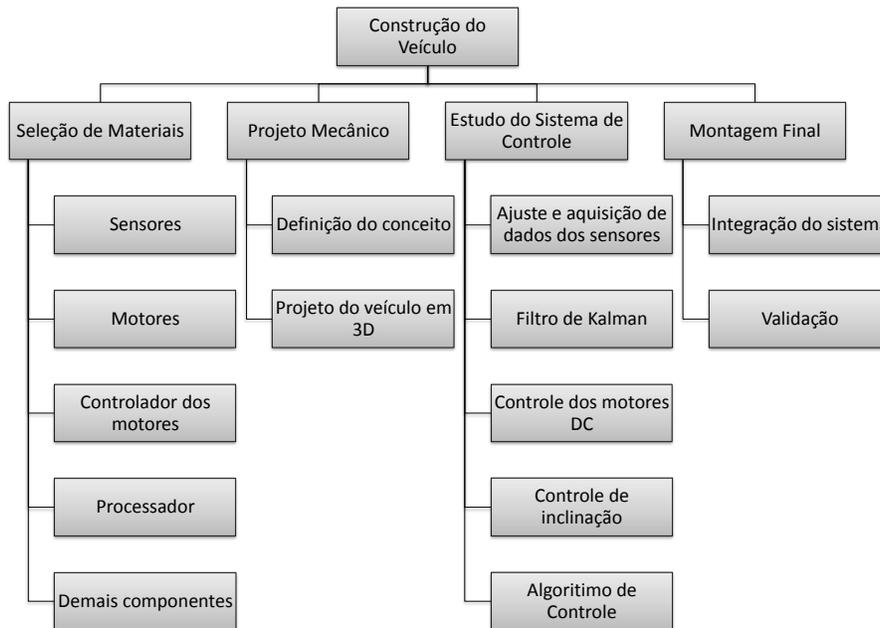


Figura 6: Fluxo de trabalho do projeto

#### 3.1. SELEÇÃO DE MATERIAIS

##### 3.1.1. SENSORES

Foi escolhido para o projeto a utilização da unidade de medição inercial SEN-11072 que é uma *breakout board* fornecida pela empresa americana *Sparkfun Electronics*.

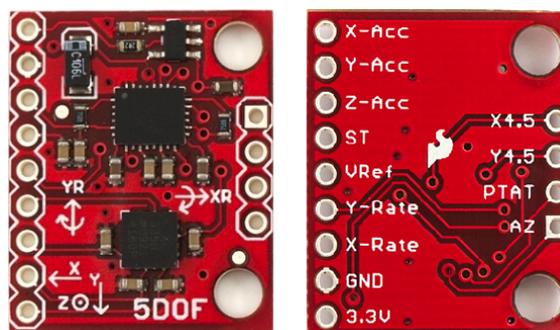


Figura 7: SEN-11072 - Vistas frontal e traseira

Uma *breakout board* nada mais é que uma placa de circuito impresso (PCI) que serve para receber e distribuir conexões por fio rápidas e limpas através de conectores ou pinos. Esta placa incorpora os circuitos integrados do giroscópio de dois eixos IDG-500 que possui como principais características:

- Escala de  $500^{\circ}/s$
- $9,1mV/^{\circ}/s$  de sensibilidade
- Tensão de operação de 2.7V à 3.3V
- Tensão de *offset* de 1.35V

e o acelerômetro de 3 eixos ADXL-335 que possui como características:

- Escala de leitura de +/- 3g
- $330 mV/g$  de sensibilidade
- Sinal de saída de 1,65V a 0g
- Tensão de operação de 1.8V à 3.6V

A placa de circuito impresso utilizada na época da compra era vendida por 35,95 Dólares no *site* da fabricante.

### 3.1.2. MOTORES

Para correta locomoção e equilíbrio do veículo é necessário que haja um controle eficiente em cada roda. Sendo assim a escolha do motor e controle que atendam o projeto são essenciais. Existem no mercado inúmeros tipos de motores como os com escova, *brushless*, servomotores e de ímã permanente.

A solução encontrada para este projeto foi a utilização de motores de escovas MY1016 que são aplicados originalmente em *scooters* elétricas. Ele tem tensão de operação de 24V e 250W de potência.

Abaixo mais especificações técnica do motor:

- Rotação nominal de 2750RPM

- 13,7A de corrente nominal
- Pinhão de 11 dentes na ponta do eixo



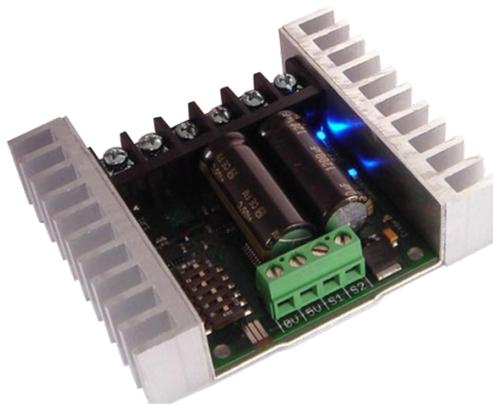
**Figura 8:** Motor MY1016

Os motores são vendidos individualmente e o modelo escolhido custa 26,80 Dólares por unidade.

### 3.1.3. CONTROLADOR DOS MOTORES

O controlador é essencial para o projeto pois este provem o controle necessário de velocidade e direção dos motores através da variação da tensão de entrada e ajustado a polaridade, respectivamente. Sem esta habilidade o veículo auto-equilibrante não seria capaz de ajustar o seu movimento para corrigir a inclinação e se locomover.

Para atender as especificações dos motores selecionados, optou-se utilizar um controlador de motor duplo, ou seja, uma única placa que permite o controle de dois motores em simultâneo. Este controlador trata-se do *Sabertooth 2X25* fabricado e vendido pela empresa americana *Dimension Engineering LLC*.



**Figura 9:** *Sabertooth 2X25*

O *Sabertooth 2x25* é um controlador versátil, eficiente e fácil de ser utilizado. Através dele pode-se controlar dois motores de corrente contínua, podendo fornecer 25A contínuos por canal (suporta picos de até 50A por canal por alguns segundos). Possui também proteção de corrente e térmica, prevenindo a danificação a placa devido a utilização de motores não dimensionados ou superaquecimento.

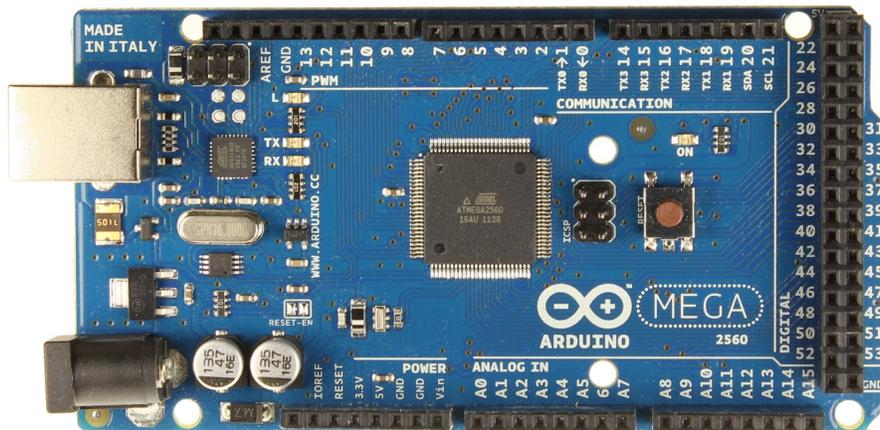
Pode ser controlado através de tensão analógica (PWM), rádio controle e serial. Possui controle independente e mixado dos canais e o modo de operação é definido através da seleção de chaves no *DIP switch* existente na placa.

Ele está disponível para venda no site do fabricante e custa 124,99 Dólares.

### 3.1.4. PROCESSADOR

O veículo será guiado através do acelerômetro e do giroscópio, no entanto deve haver um processamento dos sinais dos sensores para aplicação no controle dos motores. Para o projeto foi escolhida a utilização da plataforma de processadores Arduino.

O Arduino é uma plataforma *open-source* de microcontroladores para prototipagem eletrônica e desenvolvimento de *software*, que tem como características ser de rápida aprendizagem, baixo custo e é facilmente encontrado.



**Figura 10:** Placa do Arduino Mega 2560 R3

É baseado nos microcontroladores da linha Atmel AVR, que incluem E/S digitais, entradas analógicas, conversor analógico e memória não volátil. Sendo assim, esta plataforma de desenvolvimento atende todas as necessidades para utilização no veículo.

O modelo escolhido para o projeto foi o Arduino Mega 2560 R3, que é uma versão das placas de Arduino com maior poder de processamento e I/O's e custa 58,95 Dólares.

### **3.1.5. DEMAIS COMPONENTES**

RODAS - A função das rodas é prover locomoção, tração e suporte ao chassi do veículo. Foram escolhidas para o projeto rodas de scooter elétrica com 12,5" de diâmetro uma coroa de 90 dentes embutida.

BATERIAS - Como o veículo a ser construído tem a finalidade de ser utilizado como meio de locomoção e não dependerá de cabos, existe a necessidade da utilização de baterias com o propósito de alimentar os motores e a unidade de processamento. Para suprir a corrente exigida pelos motores, serão utilizadas duas baterias de chumbo-ácido seladas de 12V da marca *GetPower* com capacidade de 9Ah.

As rodas são vendidas individualmente e o tipo escolhido custa 47,99 Dólares por unidade. A bateria é facilmente encontrada no mercado e custa 69,90 Reais.

## **3.2. PROJETO MECÂNICO**

### **3.2.1. DEFINIÇÃO DO CONCEITO**

Com todos os principais materiais definidos e comprados, foi iniciada a segunda etapa do projeto que é a concepção mecânica do veículo.

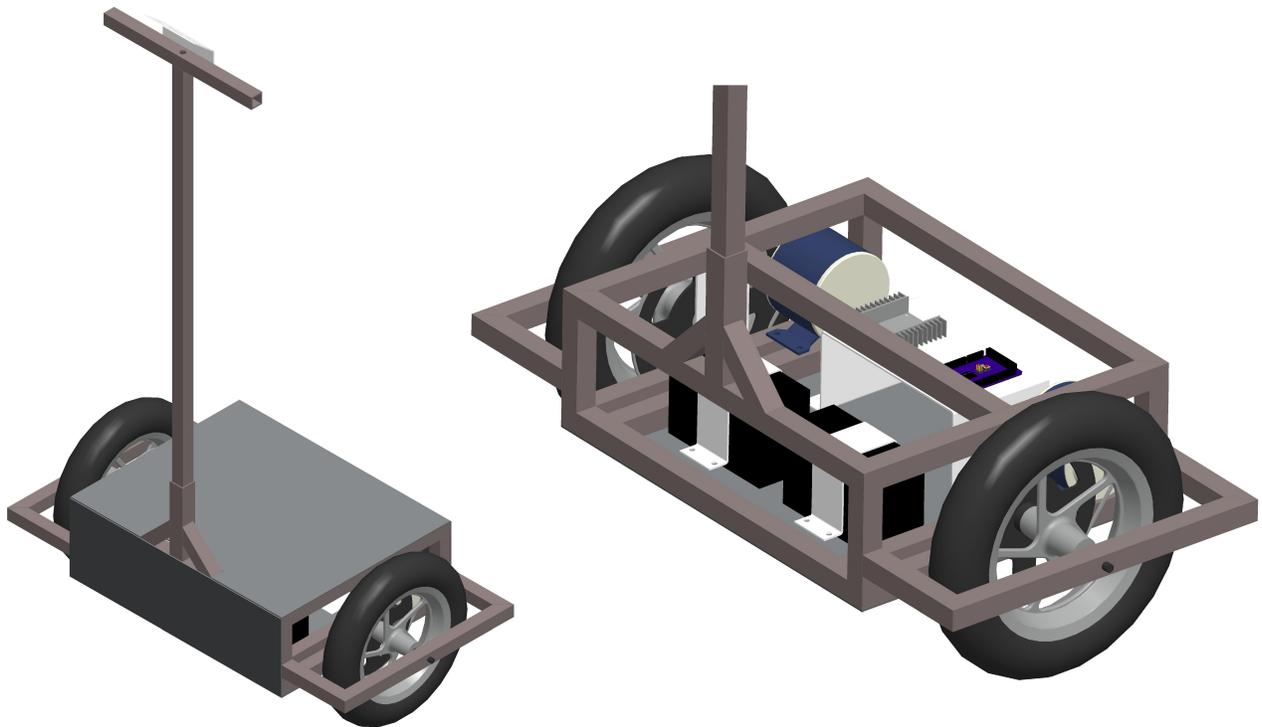
O chassi é um dos principais componentes do projeto pois é ele que abriga todos os componentes do veículo. Ele deve ser concebido de forma que permita que os sensores, baterias e controladores sejam montados sobre ele sem interferências.

Foi definido que o chassi seria construído com a utilização de perfis de aço com 25mm de seção e unidos por solda. Baixo custo, facilidade de encontrar/comprar matéria prima e a possibilidade de se simplificar o projeto/montagem são os principais fatores que levaram a esta decisão. A estrutura tubular também apresenta ótimo desempenho estrutural aos esforços de compressão, torção ou mesmo a esforços combinados, contribuindo consideravelmente na redução do peso da estrutura.

### **3.2.2. PROJETO DO VEÍCULO**

Com o conceito definido iniciou-se a etapa de detalhamento do veículo. Através do software de modelamento 3D *PRO/Engineer* foram modelados todos os componentes mecânicos como a estrutura metálica, chapas de fechamento e rodas. Também foram desenha-

dos todos os componentes elétricos utilizados no veículo para auxiliar no posicionamento de montagem dos mesmos na estrutura do veículo (figura 11).



**Figura 11:** Imagens renderizadas do modelo em 3D do veículo

Uma vez finalizados os modelos sólidos 3D dos componentes e do veículo, iniciou-se a fase de elaboração dos desenhos técnicos. O objetivo é fornecer as especificações necessárias para fabricação dos componentes e para montagem, tais como dimensões e geometrias das peças (bem como suas respectivas tolerâncias), materiais a serem empregados na fabricação dos componentes, especificações e dimensões para montagem do veículo. Também são incluídas informações necessárias para garantir as características previstas no projeto, ou que auxiliem no processo de fabricação e montagem dos componentes.

### **3.3. ESTUDO DO SISTEMA DE CONTROLE**

#### **3.3.1. AJUSTE E AQUISIÇÃO DE DADOS DOS SENSORES**

O primeiro passo para o desenvolvimento do controle do veículo é a leitura correta dos sinais dos sensores (através dos conversores analógico-digitais do Arduino) e transforma-