



Projeto

Mestrado em Engenharia Electrotécnica – Sistemas de Automação

**Condução Autónoma – Desenvolvimento de um robô
para navegação num ambiente rodoviário à escala**

Bruno Batista Neto

Leiria, novembro de 2014



Projeto

Mestrado em Engenharia Electrotécnica – Sistemas de Automação

Condução Autónoma – Desenvolvimento de um robô para navegação num ambiente rodoviário à escala

Bruno Batista Neto

Projeto de Mestrado realizado sob a orientação do Doutor Hugo Filipe Costelha de Castro e coorientação do Doutor Carlos Fernando Couceiro de Sousa Neves, Professores da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria.

Leiria, novembro de 2014

Dedicatória

A imaginação é mais importante que o conhecimento

Albert Einstein

À minha família

Agradecimentos

Com a finalização deste projeto, termino mais um ciclo da minha vida académica, que culmina com a realização deste trabalho, no qual me foi permitido aplicar todos o conhecimentos específicos que adquiri neste mesmo percurso, ao longo dos dois cursos frequentados neste mesmo instituto. Contudo, devo constatar que para chegar ao ponto de evolução deste projeto, foi necessária a ajuda e o apoio de algumas pessoas que foram contribuindo para o avanço neste mesmo caminho.

Será nesta breve apresentação que farei o meu mais sincero agradecimento aos que sempre me ajudaram nesta tarefa.

Agradeço em primeiro lugar ao Professor Doutor Carlos Neves e ao Professor Doutor Hugo Filipe Costelha de Castro pelo empenho, auxílio, motivação e luta constante ao meu lado que tornaram real o estado presente do projeto.

Devo agradecer também o apoio prestado pelo Mestre Marco Santos pela ajuda prestada na conceção de toda a eletrónica e ao Mestre David Crespo Ferreira que se mostrou incansável em auxiliar-me, apoiar-me e inclusive integrar a equipa que nos levou à vitória da prova de condução autónoma (classe “challenge”) do Festival Nacional de Robótica. Tal como a ele, devo o agradecimento aos outros participantes, os alunos André Ramos, Humberto Ribeiro e José Matias, que também ajudaram nessa prova, dando, sempre que requisitados, o seu melhor contributo.

Por fim, não me posso esquecer de agradecer ao Sr. Hélder José Alves Barros que sempre me auxiliou na procura e perceção dos modelos no qual o projeto se baseava, e agradecendo de uma forma muito especial, ao Sr. Licínio Pereira Mendes, por ter ajudado a idealizar, desenvolver e conceber toda a estrutura e alguns detalhes de precisão, com um cuidado de projeto próprio, cuja perfeição foi inigualável.

Para finalizar, resta-me agradecer a toda a minha família e, em especial, à minha namorada, pelo apoio excecional prestado ao longo deste projeto (e dos anteriores que levaram a este), o qual mostrou ser fundamental para me manter motivado ao longo do mesmo. Faço também um agradecimento geral a todos os, que de uma forma ou de outra, tiveram pequenas contribuições, mas também importantes, ao longo desta etapa e das anteriores, em especial a todos os meus colegas de curso.

A todos, um muito obrigado.

Resumo

Desde sempre que a tecnologia tem procurado ajudar, complementar ou mesmo substituir o ser humano em todas as suas tarefas e necessidades mais tediosas e/ou perigosas. A indústria automóvel é das que mais investe na investigação e desenvolvimento desta área, procurando desenvolver viaturas inteligentes, baseados em condução autónoma que ajudem o ser humano enquanto condutor, seja ao nível do conforto como da segurança. Em Portugal, no Festival Nacional de Robótica, existe uma prova onde se aplicam conceitos de decisão, controlo e visão para a condução autónoma num ambiente à escala.

É com este conceito em mente que se executa este projeto, com a intenção de construir um veículo à escala, com direção de Ackerman, com a capacidade de se conduzir sem a intervenção ou controlo humano, que possa ser também utilizado na referida prova de competição. O projeto criado é baseado num sistema de controlo de baixo nível, responsável por controlar a velocidade, direção e travagem do veículo, sob comando de um sistema de alto nível baseado em visão computacional. O sistema desenvolvido foi testado, com sucesso, numa fase preliminar na prova a que se destinava. A versão atual do veículo inclui duas câmaras (uma delas móvel) para aquisição de informação múltipla, e codificadores nas rodas para um controlo mais preciso da velocidade do veículo.

Palavras-chave: sistema de condução autónoma, robótica, controlo de veículo à escala.

Abstract

Technology has always been looking to help, complement or even substitute the human being in all its tedious and/or dangerous tasks and needs. The automotive industry is one that invests more in investigation and development on this area, looking to develop intelligent vehicles, based on autonomous driving, which help improving safety and comfort for humans as drivers. In Portugal, namely in the National Robotics Open, there is an autonomous driving competition which involves decision, control and vision concepts on a small scale street environment.

It is with this idea in mind that this project was executed, with the intent of creating a small scale vehicle, using Ackerman steering, with the ability to drive itself without human control or intervention, which may also be used in the aforementioned competition. The project is based on a low level control system for speed, steering and braking, which answers to the vision-based high level processing system. An early version of the developed system was successfully tested in the competition for what it was being prepared. The current vehicle includes two cameras (one of which is mobile) to acquire information from multiple sources, and encoders in the wheels to allow closed loop control of the vehicle speed.

Keywords: autonomous driving system, robotics, small scale vehicle control.

Lista de figuras

Figura 1.1 - Veículo autónomo “Stanley” da equipa Stanford Racing Team.	2
Figura 1.2 - Veículo autónomo “Alice” da equipa Caltech.	3
Figura 1.3 - Veículo autónomo da Google.	4
Figura 2.1 - Exemplo de pista para condução autónoma.	7
Figura 2.2 - Possibilidade de sinais apresentados no semáforo: a) Obrigação de paragem; b) Seguir para esquerda; c) Seguir em frente; d) Estacionar; e) Final de prova (neste caso as cores alternam sucessivamente).	8
Figura 2.3 - Exemplos de desafios da segunda prova (esquerda cima: Posicionamento de obstáculo; esquerda baixo: posicionamento de sinal de trânsito; direita: exemplos de sinais de trânsito colocados).	9
Figura 2.4 - Exemplos de desafios da terceira prova (esquerda: zona de obras; centro: túnel; direita: estacionamento semi-ocupado.	10
Figura 2.5 - Sistema obrigatório de segurança a instalar nos veículos.	11
Figura 3.1 – Modelo de base utilizado para o desenvolvimento do robô.	13
Figura 3.2 - Sistema geral de controlo e fluxo de informação.	15
Figura 3.3 – Demonstração de diferença de deslocamento de duas rodas do mesmo eixo ao longo de uma curva.	16
Figura 3.4 - Princípio de funcionamento do robô baseado na geometria de Ackerman.	17
Figura 3.5 – Sistema de acionamento do travão de disco do robô.	18
Figura 3.6 - Imagem de lista de bandas refletoras e aplicação de sensores.	19
Figura 3.7 - Circuito de alimentação do emissor/sensor de infravermelhos e circuito de adaptação do sinal de saída para formato de pulsos.	20
Figura 3.8 – Peça construída e exemplo de lente aplicada para substituição da lente original.	22
Figura 4.1 - Exemplo de recolha de velocidades com osciloscópio.	29
Figura 4.2– Valores calculados de consumos máximos e médios.	30
Figura 4.3 – Relação entre sinal de PWM enviado pelo escravo e sinal analógico recebido no mesmo (câmara).	32

Figura 4.4 - Relação entre sinal de PWM enviado pelo escravo e sinal analógico recebido no mesmo (rodas).	32
Figura 4.5 - Gráfico que relaciona o valor enviado para a ESC e a velocidade angular obtida.....	33
Figura 4.6 - Exemplo de recolha de velocidade angular com o tacómetro.....	35
Figura 4.7 – Tabela Classificativa do FNR.....	36

Lista de tabelas

Tabela 1 - Tabela de bonificações para a identificação de sinais de trânsito.....	41
Tabela 2 - Tabela de penalizações associadas a infrações	41
Tabela 3 - Consumos de corrente para diferentes velocidades	42
Tabela 4 - Registo de velocidades medidas com tacómetro	43
Tabela 5 - Testes comparativos de leitura por tacómetro e por <i>encoders</i>	44
Tabela 6 - Correspondência entre sinal emitido em PWM e sinal recebido pelo ADC	49

Lista de siglas

ESC – Controlo electrónico de velocidade (*Electronic Speed Control*)

PWM – Modulação por largura de pulso (*Pulse Width Modulation*)

USB – Barramento série universal (*Universal Serial Bus*)

ROS – Sistema operativo de robô (*Robot Operating System*)

CPU – Unidade de Processamento Central (*Central Processing Unit*)

V – Volts

LED – Diodo Emissor de Luz (*Light Emitting Diode*)

RGB – Vermelho verde azul (*Red Green Blue*)

FNR – Festival Nacional de Robótica

ADC – Conversor Analógico – Digital (*Analog-Digital Converter*)

Índice

LISTA DE FIGURAS	XI
LISTA DE TABELAS	XIII
LISTA DE SIGLAS	XV
ÍNDICE	XVII
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Motivação	1
1.2. Objetivos do projeto	4
1.3. Estrutura do relatório	5
2. CONDUÇÃO AUTÓNOMA NO FNR (FESTIVAL NACIONAL DE ROBÓTICA)	7
2.1.1. Tecnologias utilizadas	11
3. VEÍCULO DESENVOLVIDO	13
3.1. Hardware	15
3.1.1. Sistema de acionamentos mecânicos	16
3.1.2. Sistema de controlo de baixo nível	19
3.1.3. Sistema de Processamento Central (mestre)	21
3.1.4. Sistema de aquisição de imagem	21
3.1.5. Outros sistemas	22
3.2. Software de controlo de baixo nível	23
3.3. Software de controlo de alto nível	25
3.3.1. Sistema de visão – seguimento de via de condução	26
3.3.2. Sistema de visão – identificação de passadeira	26
3.3.3. Sistema de visão – reconhecimento de sinais no semáforo	27
3.3.4. Sistema de visão – túnel	28

3.3.5.	Sistema de visão – identificação de obstáculos	28
4.	TESTES E RESULTADOS	29
4.1.	Testes de consumo	29
4.2.	Testes de rotação da câmara	31
4.3.	Testes de direção das rodas	32
4.4.	Teste de velocidade	33
4.5.	Teste de Leitura de Velocidade	34
4.6.	Resultados preliminares - Participação no Festival Nacional de Robótica	35
5.	CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO	37
5.1.	Conclusões do trabalho realizado	37
5.2.	Sugestões a trabalhos futuros	38
	BIBLIOGRAFIA	39
	ANEXOS	41
	A – Regulamentos do FNR relativamente à prova de condução autónoma	41
	B – Cálculos associados a testes efetuados	42

1. Introdução

Desde sempre que a tecnologia tem procurado ajudar, completar ou mesmo substituir o ser humano em todas as suas tarefas e necessidades. Na indústria automóvel é facilmente verificada essa mesma procura, que resulta em esforços para desenvolver tecnologias que possam melhorar a condição do ser humano enquanto condutor de uma viatura, tanto seja em matérias de conforto como de segurança. Nos veículos existentes no dia-a-dia é possível ver essa tecnologia aplicada desde em sistemas simples, como os de velocidade de cruzeiro (*cruise control*) ou o controlo de estabilidade, até sistemas mais complexos como os de travagem automática e a sinalização de limite de faixa de rodagem. A investigação porém, continua a desenvolver-se cada vez mais com o aumento da tecnologia, estando já mesmo na fase de desenvolvimento de veículos inteligentes, baseados em condução autónoma, que deixarão de ter necessidade de intervenção humana durante a condução em qualquer tipo de ambiente. É com base nesses protótipos já desenvolvidos e nos seus princípios de funcionamento que se irá desenvolver este projeto.

1.1. Motivação

O primeiro veículo autónomo foi construído em 1977, no Laboratório de Engenharia Mecânica da Universidade de Tsukuba, no Japão. Tratava-se de um carro dotado com um sistema de visão computacional baseada em câmaras de televisão e uma unidade de processamento. Este sistema de visão permitia a deteção de obstáculos e seguir as linhas brancas marcadas nas estradas. Este veículo conseguia atingir velocidades de 30 Km/h [1]. Para a época, este veículo autónomo constituiu um grande desafio, uma vez que os computadores ainda tinham uma capacidade de processamento muito limitada.



Figura 1.1 - Veículo autónomo “Stanley” da equipa Stanford Racing Team.

De forma a incentivar a investigação nesta área (navegação autónoma), o governo Norte-americano em conjunto com a DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) criou um concurso internacional. Neste concurso de referência mundial, o objetivo dos veículos participantes é o de percorrerem um determinado trajeto num período de tempo limitado. Um dos mais conhecidos veículos participantes desta prova, designado “Stanley”, da equipa *Stanford Racing Team*, foi desenvolvido a partir de um Volkswagen Touareg R5 TDI, ilustrado na Figura 1.1. Em termos de sensores este veículo era constituído por duas unidades de navegação por GPS (*Global Positioning System*), cinco LADARs (*Laser Detection and Ranging*), dois radares, uma câmara de vídeo a cores, uma unidade de medição de inércia (IMU) constituída por três giroscópios e três acelerómetros. A informação gerada por este sistema sensorial era processada em seis computadores. Estes computadores eram também responsáveis pela navegação controlo do veículo. Este veículo venceu a prova DARPA *Grand Challenge* 2005, percorrendo 210,8 quilómetros no deserto de Mohave em 6 horas e 53 minutos [2].

Outro exemplo documentado é o “Alice”, da equipa *Caltech*. É baseado num Ford E-350 Van, ilustrado na Figura 1.2. À semelhança de *Stanley*, este veículo autónomo também utilizava cinco LADARs. Adicionalmente, estava equipado com cinco câmaras, duas unidades de navegação por GPS, uma unidade de medição de inércia e diversos sensores e

atuadores. O processamento da informação gerada pelos sensores e o total controlo da navegação do veículo era efetuado por sete computadores. A alimentação destes sistemas exigiu uma fonte de alimentação de 3 kW (120 V_{AC}) [3].



Figura 1.2 - Veículo autónomo “Alice” da equipa Caltech.

Já fora da competição da DARPA, mas também um projeto interessante dentro deste foco, é de referir o veículo autónomo desenvolvido pela *Google*, ilustrado na Figura 1.3. Este veículo é baseado num Toyota Prius. À semelhança dos veículos anteriormente apresentados, este também utiliza o sistema LADAR para criar um mapa a três dimensões do meio envolvente. Adicionalmente, utiliza um sistema de navegação por GPS, radares, uma câmara de vídeo, uma unidade de medição de inércia, e diversos sensores e atuadores.

É dentro destes conceitos, mas num ponto de vista mais académico, com o intuito de fomentar a investigação nesta área, que é criada a prova de condução autónoma, a mais antiga das provas do Festival Nacional de Robótica, um encontro científico a nível nacional no qual são promovidos os desenvolvimentos técnicos e científicos nesta mesma área. Esta prova traz consigo o objetivo de, sob a forma de competição, comparar veículos à escala desenvolvidos para se conduzirem de forma autónoma num percurso pré-definido com as características à escala de uma estrada real [4].



Figura 1.3 - Veículo autónomo da Google.

1.2. Objetivos do projeto

Com este projeto pretende-se a construção de raiz de um veículo que, com visão computacional e capacidade sensorial, possa facultar a um sistema inteligente a capacidade de se conduzir, ao longo de um qualquer percurso equivalente a uma estrada real, sem qualquer tipo de intervenção ou interferência humana. O exemplo de percurso é baseado no existente na prova de condução autónoma do Festival Nacional de Robótica.

Assim sendo, a definição dos trabalhos a desenvolver fazer deverá ser a seguinte:

- Conhecimento geral das regras e especificações do concurso de forma a planear a construção do robô/veículo;
- Levantamento de tecnologias utilizadas em sistemas similares.
- Estudo e escolha da base a utilizar de forma a economizar recursos temporais e financeiros;
- Definição da estrutura de decisões e definição de hierarquias de informação e controlo;
- Construção/adaptação da estrutura base (chassis), com a inclusão de todos os acionamentos de baixo nível;

- Construção/adaptação da estrutura superior, com inclusão e posicionamento dos instrumentos de visão, sistemas de informação e de controlo;
- Programação dos sistemas de informação e controlo;
- Aperfeiçoamento do controlo, baseado na construção/adição de sistemas sensoriais;

1.3. Estrutura do relatório

Nesta secção será descrita a forma como este documento é apresentado e organizado, dando uma noção geral da informação apresentada em cada um dos capítulos.

No capítulo 1 é possível ler uma breve introdução ao documento criado, bem como a apresentação do interesse particular deste projeto partindo do conceito geral de condução autónoma e apresentando, por fim, detalhadamente, os objetivos específicos.

No capítulo 0 é apresentado o conceito de condução autónoma de forma mais focada à escala e interesse deste projeto. Neste é apresentado também o formato e regulamento da competição que define o âmbito do projeto, apresentando um levantamento de alguns dos robôs/veículos já participantes nesta competição, bem como das respetivas tecnologias.

No capítulo 0 é apresentada toda a construção e programação do robô criado neste projeto o que inclui a sua base, estrutura, *hardware* e *software*.

No capítulo 4 são apresentados todos os testes realizados e os seus objetivos, bem como os resultados obtidos.

Por fim, no capítulo 5, são apresentadas as conclusões relativas ao trabalho desenvolvido ao longo do projeto, avaliadas as possibilidades da sua continuidade, em trabalhos futuros.

2. Condução autónoma no FNR (Festival Nacional de Robótica)

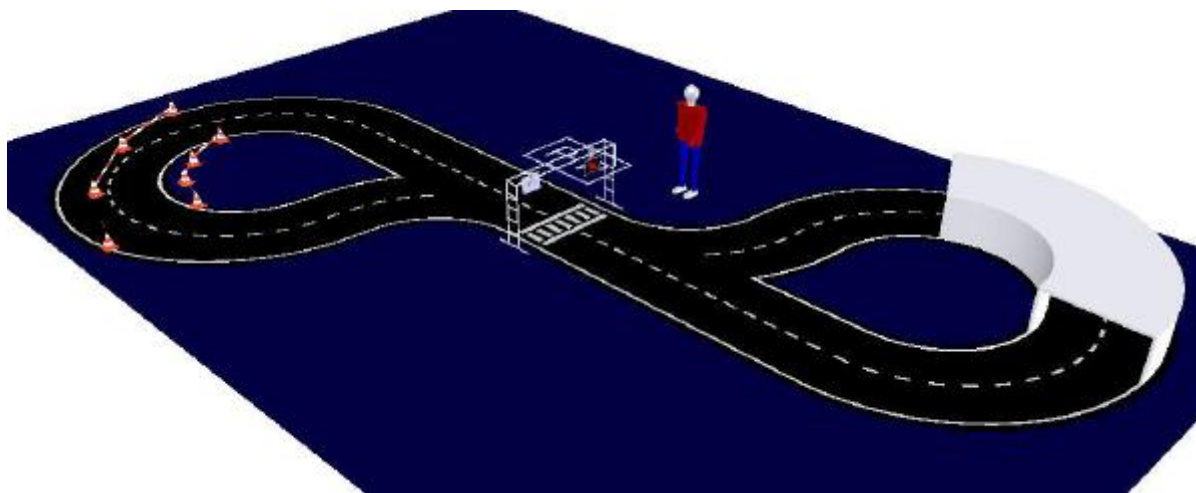


Figura 2.1 - Exemplo de pista para condução autónoma.

A condução autónoma especificada baseia-se nos seguintes parâmetros. A pista é definida por uma faixa de rodagem delimitada por duas linhas contínuas. Esta mesma faixa é dividida por uma linha tracejada (ou por vezes contínua) equidistante das duas faixas delimitadoras e que define dois sentidos de condução. No centro da pista encontra-se a representação de uma passadeira sobre a qual estão expostos dois monitores (um para cada sentido) que podem apresentar variadas sinalizações predefinidas. Junto a esta localização, logo após a passadeira, e apenas num dos sentidos está definida uma zona de estacionamento do robô fora da faixa de rodagem. Estes detalhes (que podem ser identificados na Figura 2.1 - Exemplo de pista para condução autónoma.) são gerais e não são alterados ao longo de toda a competição.

Existem outras componentes que podem ou não ser adicionadas à pista, dependendo estas da prova a efetuar. Entre eles estão:

- Sinais de trânsito diversos colocados aleatoriamente no exterior da faixa de rodagem.
- Obstáculos colocados aleatoriamente ocupando um dos sentidos de condução e/ou um dos lugares do estacionamento

- Túnel sem iluminação colocado ao longo de um trecho da faixa de rodagem sem iluminação interna
- Zona de obras delimitada por cones de trânsito (laranja e branco) e ligados por fita de trânsito (vermelha e branca) de forma a definir uma faixa de circulação alternativa à existente no solo.

Uma vez tendo noção do conceito da pista para a escala referida, é agora importante referir as regras da competição de uma forma geral, bem como as provas que as constituem. Cada robô tem direito até 4 tentativas dentro de um tempo limite de 10 minutos cada uma das provas.

As provas são divididas da seguinte forma:

A primeira prova é uma simples prova de velocidade. Toda a pista se encontra livre e o semáforo apenas funciona como sinal de arranque. Nesta prova, o robô tem que efetuar duas voltas completas no mais curto espaço de tempo, imobilizando-se ao fim.

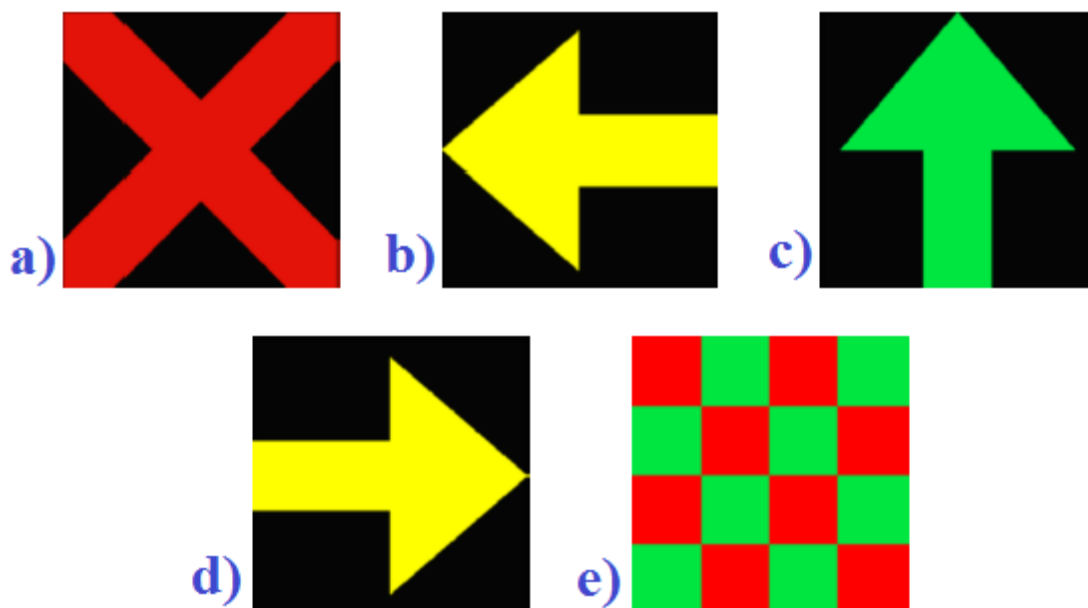


Figura 2.2 - Possibilidade de sinais apresentados no semáforo: a) Obrigação de paragem; b) Seguir para esquerda; c) Seguir em frente; d) Estacionar; e) Final de prova (neste caso as cores alternam sucessivamente).

A partir da segunda prova todos os sinais possíveis nos semáforos (Figura 2.2) podem ser apresentados e o não cumprimento das ordens ligadas a cada um deles implica penalizações. É também adicionada daqui para a frente a obrigação de estacionar o robô na zona de estacionamento, quando for sinalizado para tal nos semáforos.

Na segunda prova são adicionadas dois desafios (Figura 2.3): Será colocado um obstáculo aleatoriamente num ponto da faixa de rodagem e, do qual o robô deve desviar-se, retornando depois ao espaço que representa o seu sentido de condução. Existem também no exterior da faixa de rodagem, distribuídos aleatoriamente sinais de trânsito. A identificação destes ao longo do percurso e a respetiva sinalização correta, feita através de três díodos emissores de luz (LEDs – *Light Emitting Diode*), bonifica a pontuação do robô. No caso do sinal de trânsito apresentado ser representativo de via reservada a autocarros, este será apresentado um metro antes da linha contínua que delimita a mesma via (nos dois sentidos), via essa que o robô deverá evitar durante todo o troço referenciado pelo mesmo traço. As bonificações associadas aos sinais de trânsito podem ser vistas no anexo A.1.



Figura 2.3 - Exemplos de desafios da segunda prova (esquerda cima: Posicionamento de obstáculo; esquerda baixo: posicionamento de sinal de trânsito; direita: exemplos de sinais de trânsito colocados).

A terceira e última prova implica dois desafios diferentes e um desafio dificultado (Figura 2.4). O primeiro consiste na passagem pelo interior de um túnel sem iluminação e o segundo obriga o robô a cumprir uma trajetória alternativa, guiada por cones e fita de trânsito, como representação de zona de obras na faixa. Nesta prova também se eleva o grau de dificuldade do estacionamento do robô no final da prova, uma vez que um (aleatório) dos dois lugares se encontra ocupado por um obstáculo.

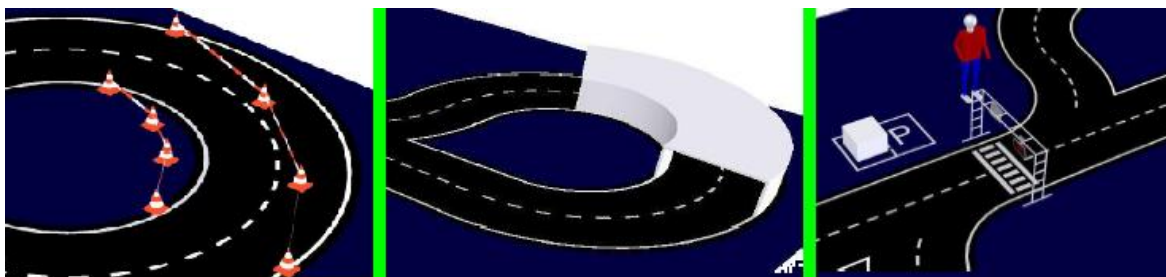


Figura 2.4 - Exemplos de desafios da terceira prova (esquerda: zona de obras; centro: túnel; direita: estacionamento semi-ocupado)

São definidas penalizações em tempo em todas as provas em situações tais como:

- Embater em qualquer acessório da pista, sair da pista parcialmente
- Não cumprir ordens do semáforo
- Parar fora da zona na ordem de paragem/meta do semáforo
- Efetuar estacionamento mal ou demoradamente
- Iniciar o arranque do robô manualmente.

São definidas também penalizações em tempo e eliminação da tentativa associadas a acontecimentos como embater num acessório da pista ou sair totalmente da pista. O peso das penalizações pode ser visto no anexo A.2.

Por uma questão de segurança é obrigatório todos os veículos existentes na prova disporem de um sistema que permita desligar a alimentação do motor através de um controlo remoto. Como tal, todos os veículos em prova devem ter instalada uma ficha (tal como apresentada na Figura 2.5) que permita ligar o sistema de proteção criado para o efeito.

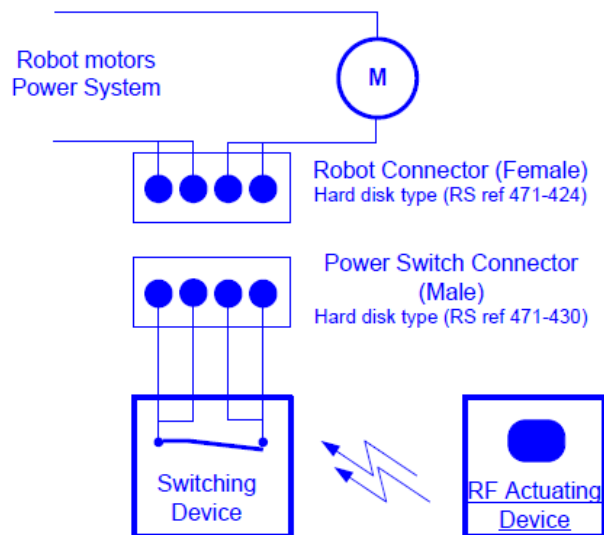


Figura 2.5 - Sistema obrigatório de segurança a instalar nos veículos.

2.1.1. Tecnologias utilizadas

Foi possível através de informação existente em vários sítios recolher algumas informações relativas a veículos criados em provas anteriores.

Como tal, é de salientar dois veículos pesquisados: Um deles o Atlas III, um robô criada na Universidade de Aveiro, sendo uma versão inicial daquele que viria a ser um dos veículos mais populares da prova; E o segundo, um robô representante da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto em 2012, sendo este um modelo com bastante informação e já num modelo mais atual e com tecnologia mais recente.

3. Veículo desenvolvido

Ao longo deste capítulo será apresentado de uma forma global todo o desenvolvimento do sistema de ação e controlo existente no robô criado, para que este se mantivesse próximo de um veículo de escala e para que o controlo deste também se baseasse numa ideia geral do comportamento do ser humano durante a sua condução habitual.

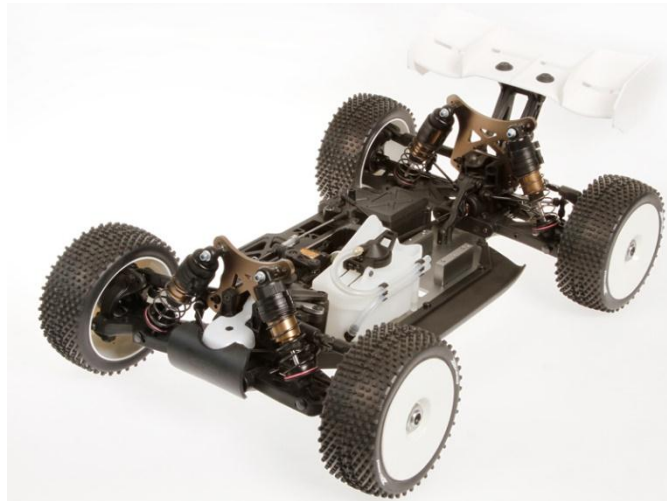


Figura 3.1 – Modelo de base utilizado para o desenvolvimento do robô.

A base utilizada para a criação do sistema desenvolvido foi o chassis de um modelo de veículo *buggy* preparado para usar um motor de combustão interna de radio modelismo com uma escala 1 para 8, como os utilizados vulgarmente para lazer ou competições do género (Figura 3.1). Uma vez que este veículo, no seu formato original, possuía um sistema de propulsão de combustão o que, quer para o desenvolvimento no âmbito deste projeto, quer para o cumprimento das regras da prova em que se visava participar, não tinha qualquer utilidade, foi necessário alterá-lo para um sistema de propulsão elétrica.

O desenvolvimento deste robô foi separado em duas fases, sendo ambas pensadas com o intuito de satisfazer necessidades futuras: uma fase inicial em que se desenvolveu o conceito básico de condução do robô (controlo de direção, de travão e de velocidade) de forma a preparar o veículo para a prova, e após esta, alguns aperfeiçoamentos do sistema (controlos e informação em malha fechada e desenvolvimento de sistemas para melhorias futuras, baseados na experiência adquirida na prova). Existirá, por vezes, a necessidade de

distinguir estas duas fases de forma a explicar o sentido e as razões de cada desenvolvimento.

Alguns dos sistemas de acionamento mecânico já existentes no veículo foram aproveitados, dado trazerem vantagens para os objetivos pretendidos. Este veículo dispõe de tração aplicada nas 4 rodas e direção de *Ackerman* nesta situação para auxiliar o robô na execução de curvas e evitar a derrapagem das rodas. Estes sistemas serão explicados com mais detalhe posteriormente neste relatório.

o sistema geral de controlo do robô é dividido num conjunto de três subsistemas que comunicam entre si, estando um associado somente à captura de informação através das câmaras existentes no robô (câmara de visão do solo e câmara de visão da sinalética), outro apenas associado ao envio e controlo de sinais para acionamentos mecânicos e, por fim, o sistema central responsável pela tomada de decisões e controlo de alto nível. A comunicação entre estes três sistemas é baseada no sistema ROS (*Robot Operating System*), um sistema que contém ferramentas que permitem a comunicação entre processos independentes através de mensagens e que permite diferentes linguagens de programação em diferentes equipamentos (este será mais detalhado adiante neste relatório). É possível visualizar através Figura 3.2 a hierarquia no sistema desenvolvido e os tipos de comunicação utilizados ao longo da mesma.

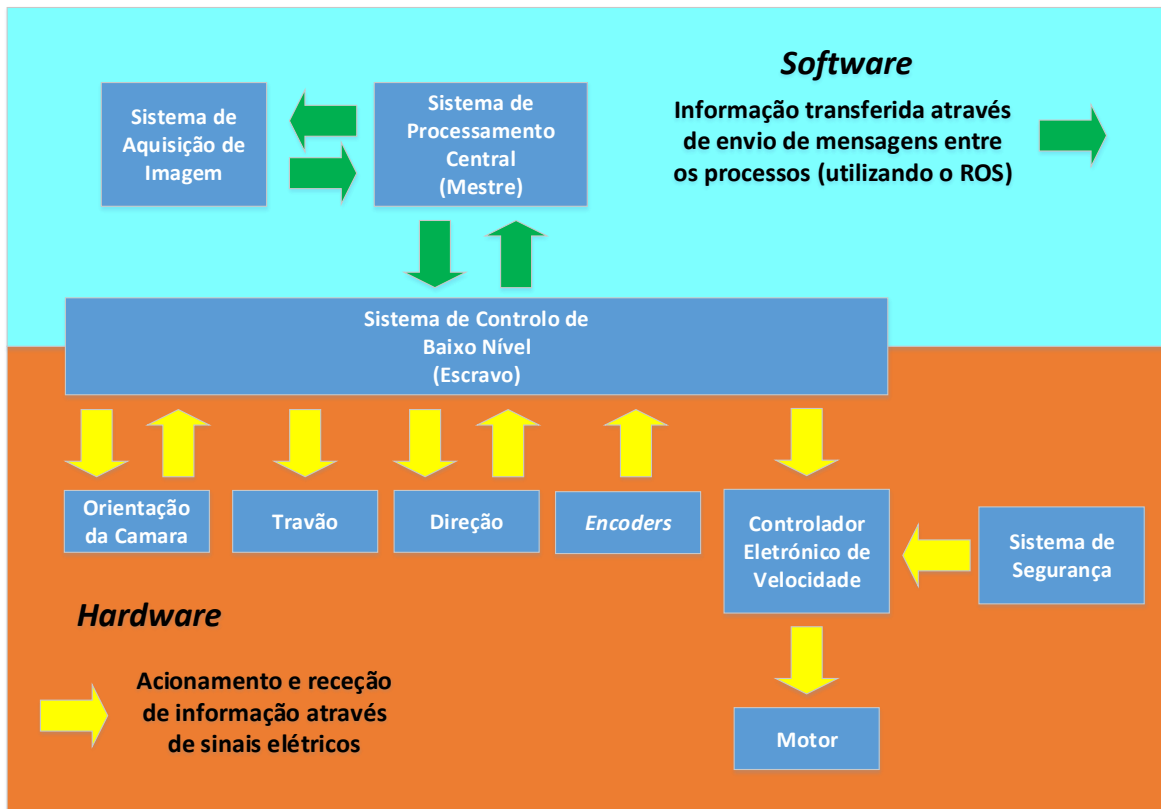


Figura 3.2 - Sistema geral de controlo e fluxo de informação.

3.1. Hardware

Partindo do princípio apresentado na Figura 3.2 é possível verificar a divisão do sistema em dois níveis. No nível inferior encontram-se os acionamentos de sistemas mecânicos, tais como velocidade, direção e travagem, e a recolha de informação de alguns deles. Por sua vez, a gestão deste sistema é feita por um sistema de controlo de baixo nível que controla todos os acionamentos mecânicos acima referidos, através do acionamento de motores e servomotores, recolhendo também do sistema mecânico informação de retorno para verificação e controlo em malha fechada de alguns dos acionamentos. Acima deste nível de controlo existe o sistema de processamento central (mestre), que faz o controlo de alto nível do robô. Neste subsistema é recolhida toda a informação relevante para a tomada de decisões e é deste subsistema que é enviada a informação para o sistema de controlo de baixo nível. Associado ao mestre temos o sistema de aquisição de imagem. Este sistema físico fornece ao mestre toda a informação captada. Por fim, existe um sistema de segurança, desenvolvido para evitar possíveis acidentes durante testes ou competições (este sistema é exigido pelo regulamento da competição).

3.1.1. Sistema de acionamentos mecânicos

Neste sistema é possível acionar todo o género de movimentos por parte do robô, bem como recolher informação relativa aos acionamentos. Uma vez que cada acionamento tem particularidades próprias, é importante distingui-los, por forma a explicar de forma sucinta cada um deles.

- **Controlo de velocidade**

Este sistema foi desenvolvido possuindo apenas um motor elétrico alimentado a 7,2 Volts controlado por um controlador eletrónico de velocidade (ESC – *Electronic Speed Controler*) de forma a gerir a velocidade aplicada ao eixo de tração e, por sua vez, distribuída pelas 4 rodas através do sistema diferencial. O sistema diferencial é implementado de forma a compensar o esforço solicitado a cada roda quando estas se têm de deslocar a velocidades diferentes. Por exemplo, durante a movimentação ao longo de uma curva a roda interior terá uma velocidade angular inferior à roda exterior (Figura 3.3), uma vez que terá de efetuar um menor deslocamento no mesmo espaço de tempo. Assim sendo, o sistema diferencial irá adequar a velocidade das duas rodas, evitando a derrapagem.

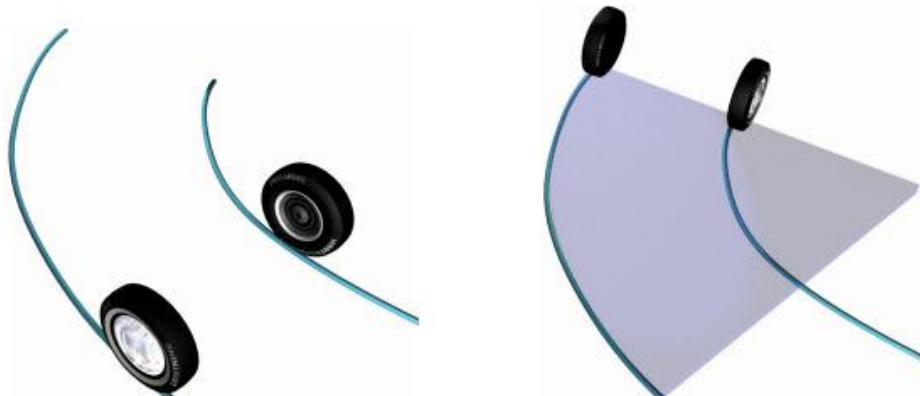


Figura 3.3 – Demonstração de diferença de deslocamento de duas rodas do mesmo eixo ao longo de uma curva.

- **Controlo de direção**

O sistema de direção mecânico do robô, tal como referido anteriormente, baseia-se na geometria de *Ackermann*, que permite orientar o ângulo das duas

rodas de direção de forma diferente. Com a aplicação desta geometria é possível que o ângulo aplicado a uma roda seja superior ao da outra roda. Para tal, é utilizando um ponto de aplicação relativo às duas rodas o que permite efetuar curvas com o robô sem a derrapagem das rodas durante esse processo. Isto verifica-se pois a roda interior (relativamente ao raio da curva) possui um ângulo de curvatura maior do que a roda exterior (Figura 3.4) agindo equilibradamente ao longo deste mesmo movimento.

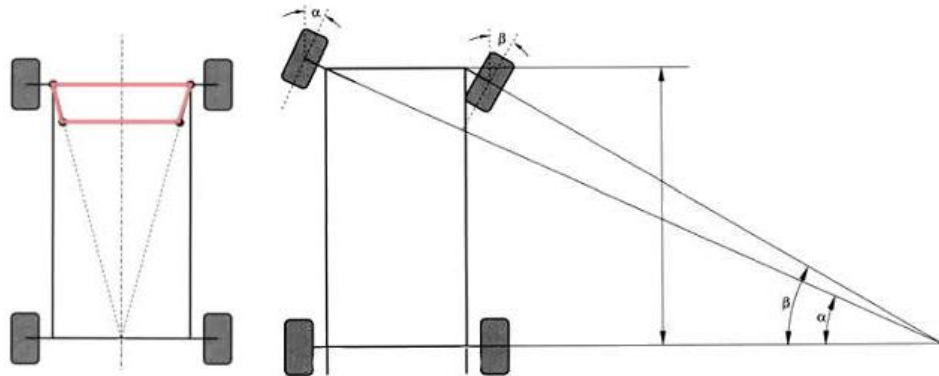


Figura 3.4 - Princípio de funcionamento do robô baseado na geometria de Ackerman.

O sistema de controlo de direção baseia-se num servomotor de posição controlado por modulação de largura de pulso (PWM – *Pulse Width Modulation*). No primeiro modelo criado, utilizou-se o servomotor HS-322HD¹ com um binário de 3kg por cm. Este permitia controlar a direção do veículo estando este em movimento, mas não quando parado e em contacto com o solo. Posteriormente optou-se por utilizar um servomotor diferente, nomeadamente o servomotor HX5010², com um binário de 6,91kg por cm. Este motor não só tornou possível alterar o ângulo das rodas com o robô apoiado no solo e parado, como também permitiu se obteve uma melhoria no tempo de resposta, passando de 0.19 segundos para 0.16 segundos por cada 60° (testes em vazio).

- **Controlo de travão**

O travão foi reaproveitado do sistema básico de travagem do veículo original que opera através de um disco de bloqueio aos dois eixos separadamente,

¹ http://www.servocity.com/html/hs-322hd_standard_deluxe.html#.VGHx8fmsWBo

² <http://www.servodatabase.com/servo/hextronik/hx5010>

forçando a sua imobilização através de um sistema de alavanca acionado gerido por um servomotor. No caso dos sistemas habituais, o veículo contém dois travões neste formato que bloqueiam o eixo dianteiro e o eixo traseiro da viatura independentemente. Neste projeto foi apenas aproveitado o travão do eixo dianteiro uma vez que este conseguia imobilizar o veículo, libertando assim o espaço utilizado pelo segundo servomotor, que foi reaproveitado para a colocação de outros componentes. Assim sendo, foi utilizado o servomotor HS-322HD para o controlo da posição da alavanca que bloqueia o disco dianteiro (Figura 3.5).

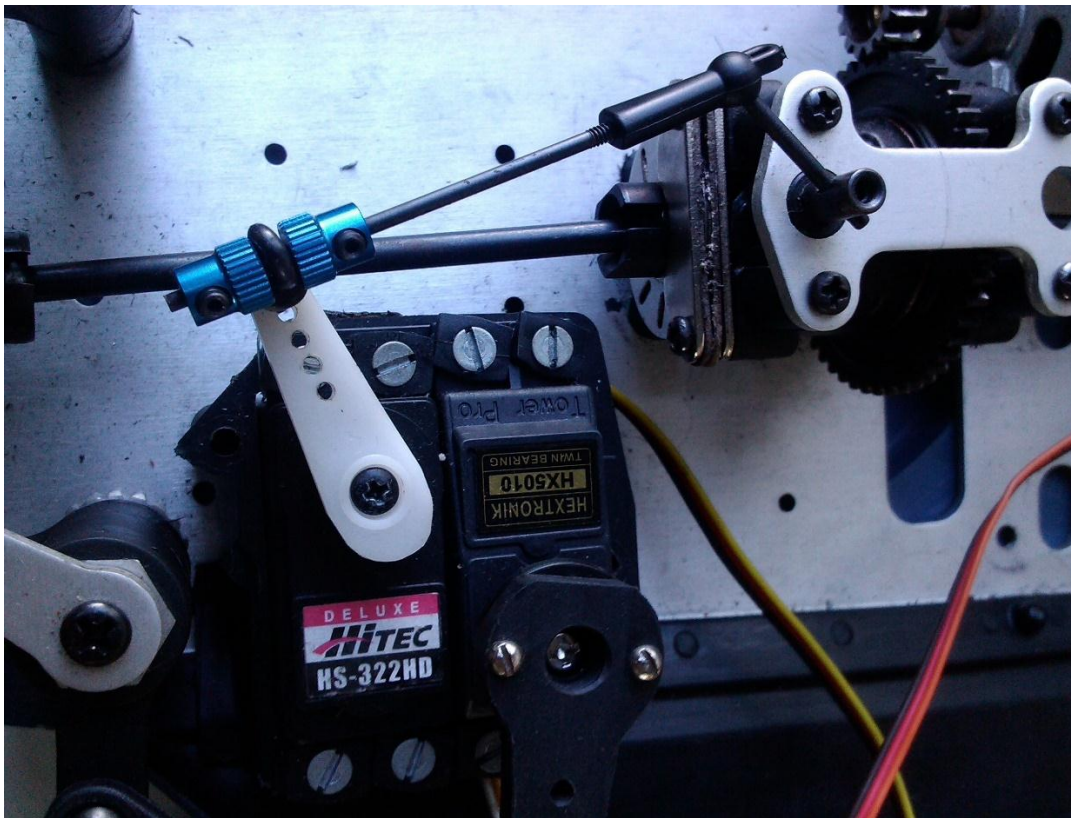


Figura 3.5 – Sistema de acionamento do travão de disco do robô.

- **Controlo de orientação da câmara de visão do solo**

Este controlo foi o único criado de raiz na segunda fase de desenvolvimento do robô. Devido à necessidade de aproximar a captura de informação do robô à que é assimilada por um condutor de um veículo automóvel, esta câmara foi colocada numa base controlada por um servomotor HS-322HD, de modo a possibilitar a orientação da câmara 90° para qualquer um dos lados, partindo da sua posição frontal.

3.1.2. Sistema de controlo de baixo nível

O sistema de baixo nível, tal como já referido acima, é um sistema que funciona intermediamente entre o mestre e o acionamento físico. Este sistema recolhe do primeiro os valores a aplicar nos acionamentos do robô (velocidade, ângulo das rodas, ângulo da câmara de visão do solo e travão), efetua o controlo dos acionamentos e envia de retorno periodicamente a informação do estado dos atuadores. Como tal, tornou-se necessário o uso de um sistema que conseguisse enviar sinais modulados por largura de pulso (PWM) para os servomotores, recolhesse sinais analógicos relativos ao estado do robô e alguma informação sobre o deslocamento do robô e ainda efetuasse algum processamento associado a cálculos de controlo. Assim sendo, tomou-se como opção a utilização de um arduino (escravo) e como a recolha individual das quatro rodas iria requerer um equipamento com a capacidade de recolha de quatro interrupções ligadas a sinais de entrada para efetuar a contagem dos pulsos, foi necessário utilizar-se o modelo mega 2560 que permite até 6 interrupções, dando a liberdade de poder executar a tarefa pretendida, bem como a possibilidade de expansão em trabalhos futuros.



Figura 3.6 - Imagem de lista de bandas refletoras e aplicação de sensores.

Tal como referido anteriormente, devido à transmissão diferencial, as 4 rodas do robô deslocam-se a velocidades diferentes, o que obriga à recolha individual do deslocamento de cada roda. Como tal, foi desenvolvido um codificador para ler o deslocamento de cada roda, constituído por uma listra de refletores (barras preta e brancas consecutivas) no interior da roda, e a utilização de um transceptor de infravermelhos no mesmo local para a correta leitura das barras. O sinal analógico recolhido pelo sensor foi

adaptado através de um circuito *schmitt-trigger* de forma a obter como saída desse sistema um sinal pulsado, em que cada pulso representa a leitura de uma faixa preta da lista de refletores. Entre estes dois circuitos (recolha e adaptação do sinal) foi inserido um circuito seguidor de tensão para garantir o isolamento dos sinais entre os circuitos e eliminar possíveis interferências mútuas. Na Figura 3.7 é apresentado o circuito elétrico de cada um dos sensores aplicados.

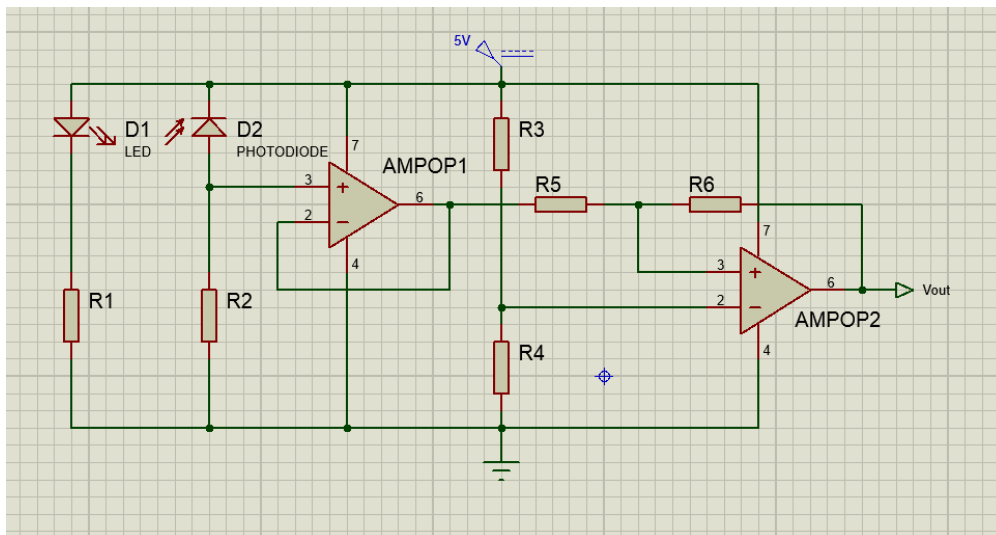


Figura 3.7 - Circuito de alimentação do emissor/sensor de infravermelhos e circuito de adaptação do sinal de saída para formato de pulsos.

Outras das necessidade foi a de ter realimentação da orientação das rodas uma vez que o este movimento não é instantâneo (tal como explicado na Secção 3.1.1), e, por isso, a posição atual pode não ser a posição solicitada pelo mestre. Torna-se portanto útil dispor da informação de posição angular atual das rodas dianteiras do robô em todos os instantes do seu funcionamento. Uma vez que o princípio de funcionamento do servomotor consiste num potenciómetro acoplado ao eixo de rotação e a um motor, que é controlado através da comparação da posição desejada e da posição atual (dada pela tensão do potenciómetro), foi retirado do interior do servomotor o sinal intermédio do potenciómetro para aquisição do sistema.

Tal como mencionado anteriormente quanto à recolha da informação de orientação das rodas do robô, este procedimento também foi efetuado para a câmara de visão do solo, mais concretamente para a leitura do sinal de ponto médio do potenciómetro que controla este servomotor. Deste modo, fica também disponível para o sistema a posição atual desta

câmara que, devido a atrasos na resposta do servomotor, poderá não coincidir com a desejada.

O sistema de controlo do travão é o único que funciona em malha aberta, visto não haver uma dependência temporal do acionamento deste e o atraso provocado de 0.19 segundos por cada 60° (teste em vazio) não ser significativo.

3.1.3. Sistema de Processamento Central (mestre)

No início do desenvolvimento deste sistema foram idealizadas várias possibilidades para colocar uma unidade de processamento no robô, entre as quais se ponderou a integração na estrutura do robô de um computador com todos os seus componentes. Esta opção teria a possibilidade de substituição e atualização dos respetivos componentes no decurso dos anos/projetos. Contudo, concluiu-se que o investimento não se justificaria, e que o mais viável seria a utilização de um computador portátil pela facilidade de utilização no desenvolvimento do projeto. Deste modo, o computador pode ser trocado por um modelo superior com o decurso do tempo, com a vantagem que todos os seus componentes (processador, memória, placa gráfica) também são consequentemente versões atualizadas e de desempenho superior. Como tal, o formato do robô foi desenvolvido para acondicionar o portátil e permitir o seu uso no decurso das provas, possibilitando também a visualização em tempo real da informação, quando desejado, por parte do programador.

Ao longo deste projeto o computador utilizado foi um portátil com um processador Intel® Core™ i7-4700HQ CPU @ 2.40GHz (8 CPUs), com uma memória de 8192 MB RAM e uma placa gráfica NVIDIA GeForce GT 745M.

3.1.4. Sistema de aquisição de imagem

Para o sistema de aquisição de imagem, e tendo como base o regulamento da prova a que se destinava o robô, era necessária a aplicação de duas câmaras, uma que focasse o solo para que o robô identificasse a pista e os seus componentes e outra que conseguisse verificar o monitor que apresenta o semáforo com as várias instruções a seguir.

Foram então utilizadas duas câmaras SLEH-00203 do fabricante SCEE, vulgarmente designadas por PS EYE. Estas câmaras possuem comunicação série via USB, uma frequência de aquisição de 640 x 480 píxeis a 60 imagens por segundo, ou de 320 x 240 píxeis a 120 imagens por segundo, possuindo uma lente ótica com um ângulo de abertura de 56° ou 75°. Uma vez que este ângulo de abertura era insuficiente para a câmara utilizada na visualização do solo, foi necessário proceder à substituição da lente. Como tal, teve de ser produzida uma peça de adaptação para uma nova lente para a câmara existente e aplicar a mesma incorporada com uma lente (Figura 3.8) com ângulo de abertura de 132,9°, conseguindo assim uma aquisição de acordo com os objetivos.



Figura 3.8 – Peça construída e exemplo de lente aplicada para substituição da lente original.

O posicionamento das câmaras foi também estudado para que sua a posição e orientação das permitisse o foco apropriado dos objetos de interesse. Estas posições foram fixas para ambas as câmaras até à prova, sendo posteriormente alterada a câmara de visão do solo (tal como explicado na Secção 3.1.1). Este melhoramento possibilitou a aquisição de informação nas posições em que o ponto focal tem de ter uma orientação que não a da direção da estrutura do veículo, mas sim da orientação das rodas dianteiras do robô.

3.1.5. Outros sistemas

Antes de encerrar o capítulo do *hardware* é necessário salientar alguns melhoramentos adicionais de construção do robô, bem como indicar o sistema de segurança incorporado.

- **Estabilidade do robô**

Da estrutura inicial do robô foram retiradas todas as partes ligadas ao sistema de combustão. Foram também feitas algumas alterações físicas de forma a tornar o robô melhor adaptado à prova e aos objetivos, tais como a remoção dos amortecedores existentes, sendo substituídos por barras fixas de forma a tornar o veículo mais estável. Estas barras foram também alongadas em comprimentos, para que o veículo possua menor distância ao solo, posicionando assim o seu centro de massa numa posição mais baixa

- **Estrutura do robô**

Toda a construção do robô foi desenvolvida num conceito de construção modular (considerando como módulos os acionamentos e o *hardware* de controlo de baixo nível) com o intuito de tornar prática qualquer análise dos componentes individuais bem como facilitar a substituição de qualquer um destes componentes. O formato permite que qualquer módulo seja desligado com facilidade do grupo geral, permitindo, por exemplo, facilidade de testes na programação do subsistema escravo.

- **Segurança**

O robô dispõe de um dispositivo de segurança, exigido pelo regulamento da competição, que permite que o motor elétrico seja desligado através de um comando à distância. Como este elemento de acionamento não foi utilizado na competição, o dispositivo foi adaptado para que fosse possível o seu acionamento através de uma ação física (remoção de um contacto) de forma a ser possível, com algum atraso de reação e a alguma distância, desativar o motor do veículo.

O sistema encontra-se preparado para funcionar em qualquer um dos modos descritos

3.2. *Software* de controlo de baixo nível

O *software* de controlo de baixo nível é, na sua componente principal, o programa executado no escravo. De uma forma geral o que este programa faz é receber um conjunto de dados sobre o estado desejado pelo mestre para cada acionamento, alterar e controlar o estado dos acionamentos através de um conjunto de sinais lidos destes (quando existam) e devolver um conjunto de dados sobre o estado atual daqueles componentes. Esta

comunicação é feita através do sistema de transmissão de mensagens do ROS. Este sistema funciona como um sistema de interação entre processos baseado em mensagens depositadas em tópicos. Alguns processos (publicadores) registam mensagens nos tópicos, para que outros (subscritores) as leiam. Uma das principais vantagens deste sistema consiste no facto de as mensagens poderem ser trocadas entre processos totalmente independentes. Quando uma nova mensagem é escrita no tópico que o *software* de baixo nível está a subscrever, a função de leitura dos dados na mensagem é chamada, que apenas atualiza os valores utilizados pelo sistema, uma vez que o controlo se encontra a ser constantemente realizado para os valores definidos. Este controlo é diferente para cada acionamento portanto irá ser explicado de seguida em detalhe:

- **Controlo de velocidade**

O controlo de velocidade é o mais complexo dentro da programação do controlo de baixo nível. Uma vez que cada roda envia um sinal (pulso) é necessário que o sistema consiga capturar todos os sinais criados ao longo de uma volta na velocidade máxima que é possível de aplicar numa roda. Para tal, o sistema tem que receber uma interrupção ao seu programa para assinalar que o sinal de estado se alterou de 0 para 1 (0V para 5V) ou vice-versa, ou ambos. Para que não se ocupe muito tempo de processamento nestas interrupções (visto existirem 4 sinais a serem alterados constantemente) apenas é incrementado um contador relativo à interrupção criada. Existe outra interrupção criada para ocorrer em ciclos definidos de tempo (1 segundo) que, quando chamada, efetua o cálculo para saber quantos pulsos foram contados ao longo desse segundo, calculando assim a velocidade de cada roda e a velocidade do robô através do cálculo da velocidade do veículo. Com o valor obtido é feito um controlo proporcional e integral da velocidade em malha fechada. Para testar o sistema e a sua capacidade de leitura de frequência de sinal utilizou-se o sistema em vazio e chegou-se à conclusão de que o sistema funcionaria com fiabilidade a uma velocidade máxima de 14,45 voltas por segundo com um total de 40 bandas (pretas e brancas), identificando os flancos ascendentes e descendentes. Conseguem-se assim identificar 80 pulsos, ou seja, com uma resolução de 4,34 mm em cada roda. Os testes de velocidade das rodas e os testes do contador podem ser verificados nos anexos B.2 e B.3, respetivamente.

- **Controlo de direção e controlo de orientação de câmara de visão do solo**
Apesar de nestes dois controlos haver um retorno de informação do estado atual por parte dos acionamentos, o sistema funciona como um sistema de controlo em malha aberta. O sistema recebe a orientação desejada e emite o sinal correspondente em modelação de largura de pulso (PWM) para o respetivo servomotor. Toda esta ação é feita no ciclo principal do programa não estando ligada a nenhuma interrupção. No mesmo ciclo é também recolhido o valor analógico que representa, através de uma relação linear ($Valor\ analógico\ recebido = 1,6364 \times valor\ PWM\ enviado + 80,4544$ para a câmara e para a direção), o estado atual da orientação do servomotor. As tabelas de dados recolhidos para identificar as fórmulas e o seu cálculo são apresentadas no anexo B.4. Este valor é, no final de cada ciclo, atualizado na mensagem para o tópico de informação para o mestre.
- **Controlo de travão**
Para o controlo do travão foram apenas identificadas duas posições do servomotor. Uma em que o travão está ativo e outra na qual está liberto. A mensagem enviada pelo mestre apenas identifica o travão como estando ligado (valor 1) ou desligado (valor 0). O escravo envia o correspondente sinal em PWM referente à posição desejada do servomotor e coloca esse valor na mensagem que é enviada para o mestre, não como forma de reconhecimento do estado atual mas sim como forma de identificação de receção do pedido.

3.3. *Software* de controlo de alto nível

Esta secção refere-se sobretudo às tarefas executadas pelo mestre. Este tem como função principal recolher informação das câmaras (a de visão do solo baseada na sua posição) e tomar decisões sobre as alterações a provocar nos acionamentos para efetuar a trajetória calculada/desejada. A informação recolhida pelas câmaras é disponibilizada através das correspondentes mensagens do sistema ROS publicadas num tópico referente à câmara. O mestre recolhe as imagens enviadas nas mensagens e separa, para o interesse de

cada cálculo, áreas, valores e pontos específicos da imagem. Estes interesses são nomeados individualmente de seguida, explicando também os processos utilizados para tentar atingir cada um deles:

3.3.1. Sistema de visão – seguimento de via de condução

Para o seguimento da via de condução e decisões associadas a este processo, o sistema de visão utilizado baseia-se num fator simples: a existência de uma linha do lado direito da faixa que delimita a pista. Assim sendo, o robô utiliza a sua câmara de visão do solo para verificar que o veículo se mantém a uma distância dessa mesma linha o que obriga à sua identificação de qualquer tomada de decisão. Para identificar a linha, o sistema limita a área da captura que lhe é enviada a um retângulo de interesse. O programa recolhe a informação da região de interesse mas definindo-a para apresentar apenas a imagem na sua variação de luminâncias (tons de cinzento). A esta imagem tiram-se todos pontos que tiverem um nível de brilho inferior a um limiar definido, ficando apenas com os objetos de mais brilho da imagem (nos quais se incluem as linhas de marcação da faixa de rodagem do robô. Após este processo, tiram-se os contornos de todos os objetos restantes na imagem e organizam-se por ordem de proximidade ao canto inferior direito da imagem, ignorando para este processo todos os contornos criados de pequena dimensão. De seguida escolhe-se um contorno que tenha um comprimento mínimo aceitável, ou seja, que varra um comprimento grande nas linhas da imagem utilizada. Utilizando a distância entre o ponto do centro de foco e a interceção da linha do mesmo com o contorno, controla-se a distancia a que o robô se encontra da linha e, por sua vez, o ângulo de viragem para compensar o erro utilizando um controlo proporcional.

3.3.2. Sistema de visão – identificação de passadeira

A câmara utilizada para o reconhecimento da passadeira é a mesma que identifica o seguimento de via. Por isso, é partindo do processo de reconhecimento da zonas de alto brilho que esta mesma imagem resultante é utilizada para identificação de passadeiras. No

momento em que a passadeira é visualizada, e à medida que a distância diminui, o número de pixels brancos presentes na imagem aumenta. Como tal, foi apenas necessário aplicar à imagem um contador do número de pixels brancos e atribuir um valor a partir do qual se considera que a passadeira estará presente. Acrescentou-se ainda um contador de ciclos para verificar a consistência da presença da passadeira (para evitar que apenas com uma imagem se admitisse que a passadeira estaria presente) e, por fim, aplicou-se o mesmo processo, mas de forma inversa, para confirmar que a passadeira já não está visível e que se poderia iniciar uma procura da próxima passadeira presente.

3.3.3. Sistema de visão – reconhecimento de sinais no semáforo

Para este processo utilizou-se a câmara de visão do monitor, mas para o reconhecimento dos sinais do semáforo é necessário definir dois modos de funcionamento. Um primeiro modo de funcionamento, no início de cada prova, em que o sinal apresenta um sinal no formato de uma cruz vermelha até que seja autorizado o arranque do robô através da alteração do semáforo para um sinal de direção. Na continuidade da prova o mesmo semáforo poderia indicar a obrigação de parar, a indicação de direção a tomar (podendo esta ser em frente ou para a esquerda), um sinal de final de prova (que também obrigaria a parar) ou uma indicação de estacionamento.

Como tal, e para identificar esta alteração, reduziu-se a área desejada para a área apontada para o monitor e extraiu-se da imagem apenas a sua componente vermelha e calculou-se a média dos valores existentes na imagem. Quando esta é alterada de uma imagem para a seguinte de forma brusca, significa que o sinal se alterou, o que significa autorização de partida.

No caso da leitura de sinais, a estratégia inicia-se por localizar a presença do monitor (quando o robô se encontra em movimento uma vez que no arranque este já estaria identificado) através da procura de aglomerados de pixels sem luminância, visto que, independentemente do sinal, o seu fundo permanece escuro o que tem predominância. Após essa identificação, e caso seja apresentado o sinal de paragem, a ordem de travar o robô, este tem de identificar o sinal seguinte, referente ao sentido a seguir. Retirando da imagem diversas componentes de cor de forma a encontrar quais as condições mais

próximas para identificar os vários sinais. Foi possível identificar os vários sinais existentes mas concluiu-se que a dependência destes da luz solar era muito grande, afetando assim os testes realizados ao longo dos dias e das provas.

3.3.4. Sistema de visão – túnel

No caso da visão no interior do túnel não foi necessário efetuar alterações uma vez que a seleção de objetos de alto brilho existentes na imagem recolhida pela câmara de visão do solo permite ao robô identificar a via de condução e segui-la dentro do túnel sem qualquer tipo de erro. Durante a prova foi ainda idealizado e montado um foco de luz alimentado por uma tensão igual à que alimenta o próprio robô de forma a iluminar o interior do túnel, caso fosse necessário. Este foco de luz era constituído por um conjunto de LEDs (Díodos Emissores de Luz) de alto brilho que poderiam facilmente ser adicionados de futuro ao sistema elétrico do próprio robô e acionados apenas na dificuldade de identificação da linha. Este foco foi então rejeitado visto não ter utilidade para esta prova nem trazer benefícios ao comportamento do robô.

3.3.5. Sistema de visão – identificação de obstáculos

O sistema de identificação dos obstáculos baseou-se única e exclusivamente na sua cor. Uma vez estando esta definida *à priori*, o objetivo passou essencialmente por identificar essa mesma cor e considerar que se estaria na presença de um obstáculo sempre que aquela cor fosse identificada em quantidade na recolha da imagem da câmara de visão do solo. Repetiu-se também o sistema aplicado com a passadeira (descrito na Secção 3.3.2) de inserir um contador para dar consistência ao resultado obtido e outro para verificar a ausência do obstáculo e iniciar a procura de outro.

4. Testes e resultados

Ao longo deste capítulo será apresentado um conjunto de testes experimentais relevantes para o desenvolvimento do robô. Alguns destes testes serviram para verificar informações relevantes, para avaliar necessidades ou para validar partes dos sistemas desenvolvidos. A prova realizada no FNR é considerada como teste intermédio, apesar de ter ocorrido no decurso do desenvolvimento do robô, uma vez que foi um teste ao sistema no seu conjunto, e terem participado outros robôs concebidos com o mesmo objetivo.

4.1. Testes de consumo

Uma vez ser desconhecido o consumo destes motores ao longo de uma prova de tempo aproximadamente definido, foi importante efetuar um conjunto de testes de consumo de energia do robô.

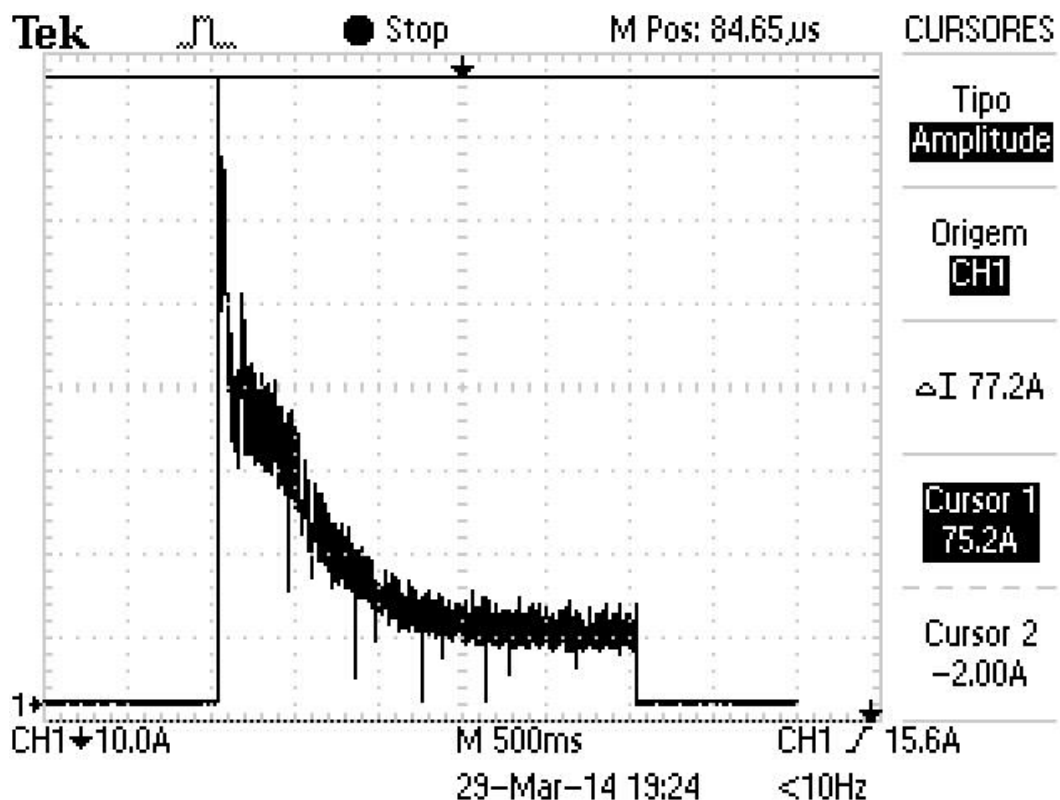


Figura 4.1 - Exemplo de recolha de velocidades com osciloscópio.

Como o maior consumo do motor ocorre na fase de arranque do veículo, efetuou-se um conjunto de arranques a várias velocidades com o objetivo de verificar o consumo

máximo nesta fase e conseguir também recolher um valor aproximado do consumo quando o veículo estabiliza em velocidade após ter arrancado. Uma vez que a relação entre a velocidade real relativamente ao valor transmitido para o ESC ainda não estava calculada, os parâmetros calculados foram relacionados com esse valor. Para a leitura foi utilizado um osciloscópio e, com o auxílio de uma pinça amperimétrica, registaram-se os valores (exemplo apresentado na Figura 4.1) procedendo-se à sua gravação. No final dos testes executados, e através do recurso ao Matlab, foram verificados todos os gráficos recolhidos de forma a obter uma tabela com os valores máximos e médios consumidos para cada velocidade. A tabela resultante deste cálculo é apresentada no anexo B.1 e os resultados gráficos podem ser visualizados na Figura 4.2. Tendo conhecimento do valor máximo e médio mais elevado registado nos testes, 75,2 ampere e 9,87 ampere respetivamente, foi dimensionada a bateria necessária ao sistema. Uma vez que cada prova tem a duração máxima de 10 minutos (1/6 de uma hora), vem que $9,87A/6 = 1,645Ah = 1645mAh$ é o valor mínimo a considerar para a bateria. Esta bateria teria de fornecer também em pico 46 vezes a sua capacidade nominal, de modo a acomodar a corrente máxima verificada no arranque do veículo ($75,2A/1.645A \approx 46$). Não existindo valores tão específicos no mercado, e deixando alguma margem para possíveis consumos adicionais, foi escolhida uma bateria de 2200mAh com a capacidade de debitar 40 vezes a sua capacidade em consumo contínuo e 80 vezes em pico. Uma bateria com estas especificações foi utilizada em prova e nos diversos testes, demonstrando ser viável para utilização, apesar de estar sujeita a cargas inferiores aos valores máximos utilizados no dimensionamento.

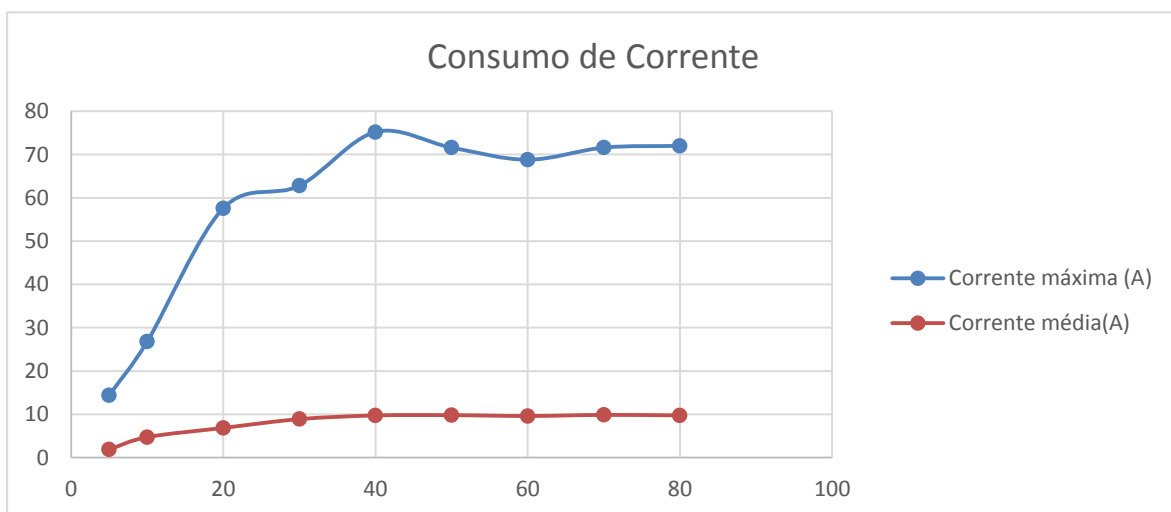


Figura 4.2– Valores calculados de consumos máximos e médios.

4.2. Testes de rotação da câmara

Após a participação na prova e a decisão de colocar um servomotor para poder efetuar a rotação da câmara de visão ao solo, foi necessário criar uma relação entre o sinal recebido pelo servomotor e o sinal de rotação enviado. Uma vez que o circuito interno de controlo do servomotor teria uma margem de erro desconhecida à partida, foi necessário efetuar um conjunto de testes de calibração (relação entrada analógica/sinal emitido e margem de erro). Como o comportamento do servomotor poderia também ser diferente consoante o sentido para o qual se movimentava, foram realizados testes nos dois sentidos (que podem ser vistos no anexo B.4). Com estes dados foi avaliada a calibração apropriada através de um programa específico para o escravo. Através dos testes foi também possível verificar que a estabilidade da relação entre os dois sinais se perdia nos valores iniciais dos sinais testados (a partir do valor 4), e também que o valor não se alterava a partir de determinado sinal enviado (180), devido a uma limitação mecânica do próprio servomotor. Eliminando estes sinais de forma a ficar apenas com a zona de funcionamento mais precisa, verificou-se assim que o resultado teria um comportamento linear (como se pode comprovar pelo gráfico apresentado na Figura 4.3). Com base nos dados foi obtida a equação que descreve esse comportamento:

$$\text{Valor analógico recebido} = 1,6364 \times \text{valor PWM enviado} + 80,4544$$

Como este valor seria posteriormente aproximado para um número inteiro, foi testada também a margem de erro depois do arredondamento, nunca ultrapassando um erro de duas unidades.

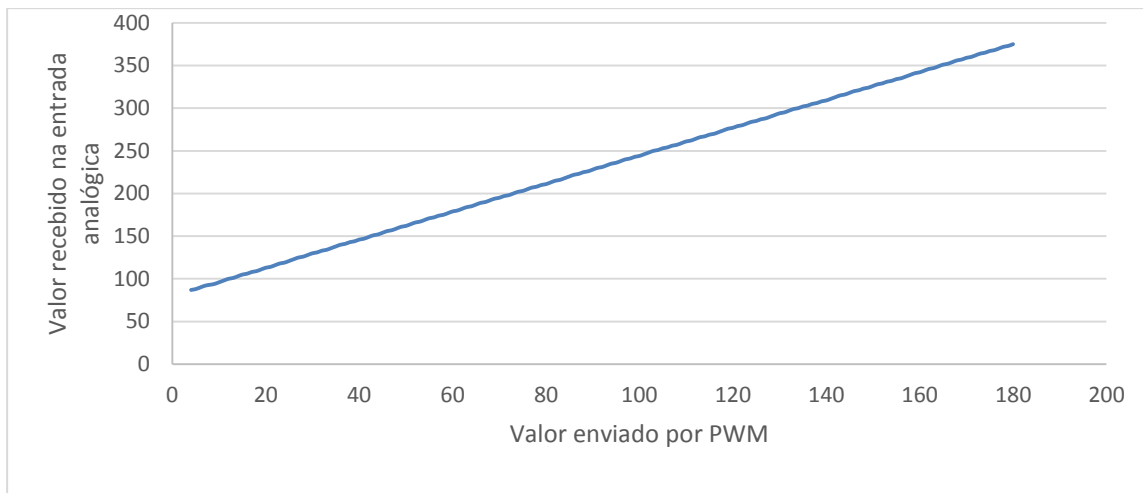


Figura 4.3 – Relação entre sinal de PWM enviado pelo escravo e sinal analógico recebido no mesmo (câmara).

4.3. Testes de direção das rodas

O teste de rotação das rodas é em tudo idêntico ao anterior (ver Secção 4.2). Assim sendo, é possível visualizar os testes efetuados para este servomotor no anexo. Tal como no caso anterior, foi necessário limitar a gama de funcionamento para obter um resultado com maior precisão obtendo-se assim o gráfico apresentado na Figura 4.4 e a reta que define esta relação:

$$\text{Valor analógico recebido} = 1,6364 \times \text{valor PWM enviado} + 80,4544$$

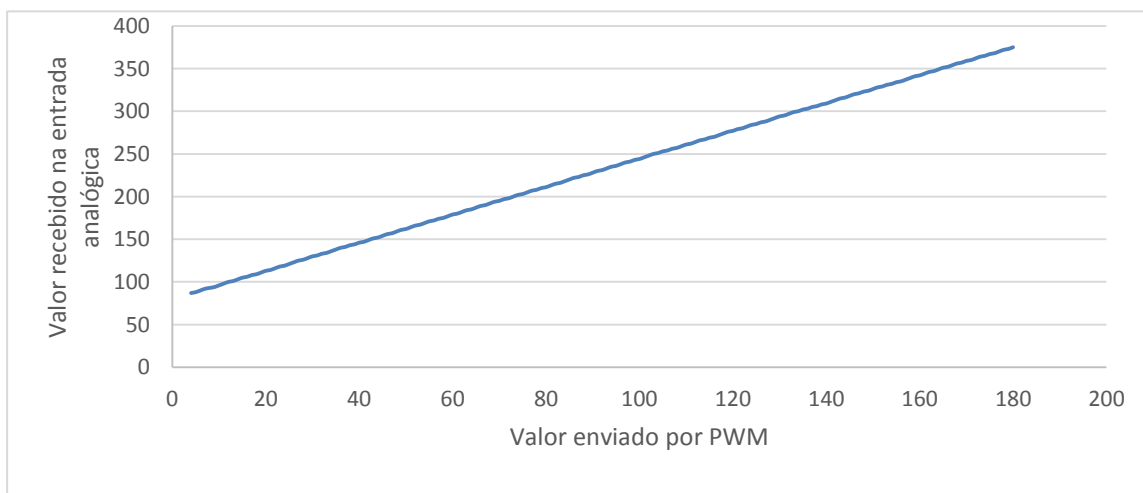


Figura 4.4 - Relação entre sinal de PWM enviado pelo escravo e sinal analógico recebido no mesmo (rodas).

4.4. Teste de velocidade

Tal como referido anteriormente, antes da realização deste teste, o valor de velocidade enviado para o ESC consistia num número inteiro entre 5 e 179. Foi preciso caracterizar a velocidade angular das rodas para se obter uma relação entre o valor enviado e a velocidade obtida. Para tal, realizou-se um conjunto de testes com um tacómetro, recolhendo amostras para construir um gráfico com essa relação. Concluiu-se que os valores limite utilizados anteriormente estavam corretos, restando então caracterizar as velocidades angulares resultantes para toda a gama de sinais enviados para o ESC. Verificou-se também que o ESC não faz controlo de velocidade em malha fechada, o que implica que o sinal enviado para o motor não vai compensar o peso adicional da estrutura do robô. Este facto resultaria numa velocidade obtida que seria inversamente proporcional ao peso efetivo do robô. Assim sendo, e devido a esta particularidade, realizaram-se testes em vazio, minimizando as dependências com o peso do robô. A tabela resultante destes testes (apresentada no anexo B.2) permitiu concluir que, além da dependência com o peso, a velocidade em ambos os sentidos não é linear, tal como é possível verificar pelo gráfico da Figura 4.5. Este teste veio reafirmar a necessidade de ter um retorno de informação associado à rotação das rodas, de forma a conseguir definir a velocidade do veículo através de um controlo em malha fechada.

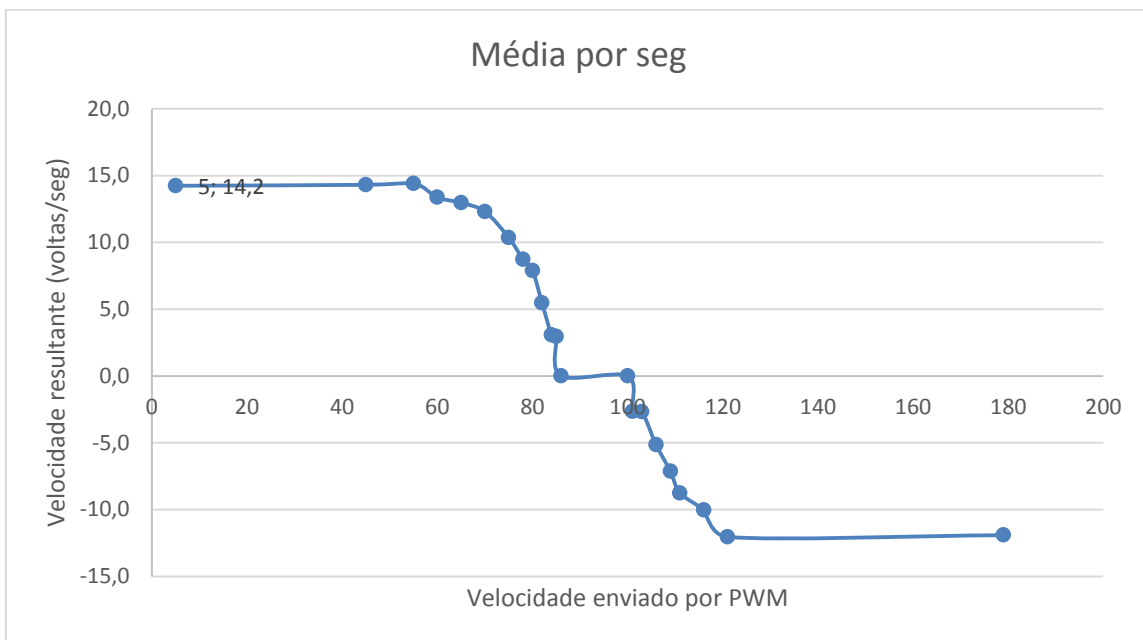


Figura 4.5 - Gráfico que relaciona o valor enviado para a ESC e a velocidade angular obtida

4.5. Teste de Leitura de Velocidade

Uma vez definida a necessidade de receber e registar o deslocamento efetuado por cada rotação completa das rodas, considerou-se necessário verificar e ajustar os dados recebidos, assim como os limites do *hardware* utilizado. Inicialmente foram testadas as capacidades de registo de interrupções por parte do arduino. Quando uma interrupção é acionada o arduino, na sua respetiva programação, tem de confirmar e registar a alteração de valor. Esta contabilização tem de ser feita para as quatro rodas em tempo útil para que a leitura esteja de acordo com o real. Como tal, e utilizando um oscilador de sinal ligado às 4 interrupções simultaneamente, a frequência do sinal foi gradualmente aumentada até o arduino ser incapaz de contabilizar corretamente as quatro interrupções. A partir de uma frequência de 3,5kHz, os valores contabilizados pelas quatro interrupções diferiam entre si num máximo de 5 unidades. Como se tratava de uma contagem de 3500 interrupções por segundo em cada um dos quatro portos, a percentagem de erro associada foi de 0,14%.

Considerando os testes anteriores (ver capítulo 4.1.4), e para se obter a frequência 3,5kHz do sinal transmitido pelas rodas quando a velocidade é máxima (14,5 rotações/seg em vazio), seria necessário ter uma lista no interior da roda com 240 barras pretas. Para o perímetro interno da roda, onde são colocadas as listas, era possível colocar 40 barras com 6,25mm cada. Como existia margem de processamento no escravo, aproveitou-se esse facto para se ativar as interrupções em ambas as transições (barra preta para barra branca, e vice-versa), passando a 80 capturas por volta (barras de 3,125mm)

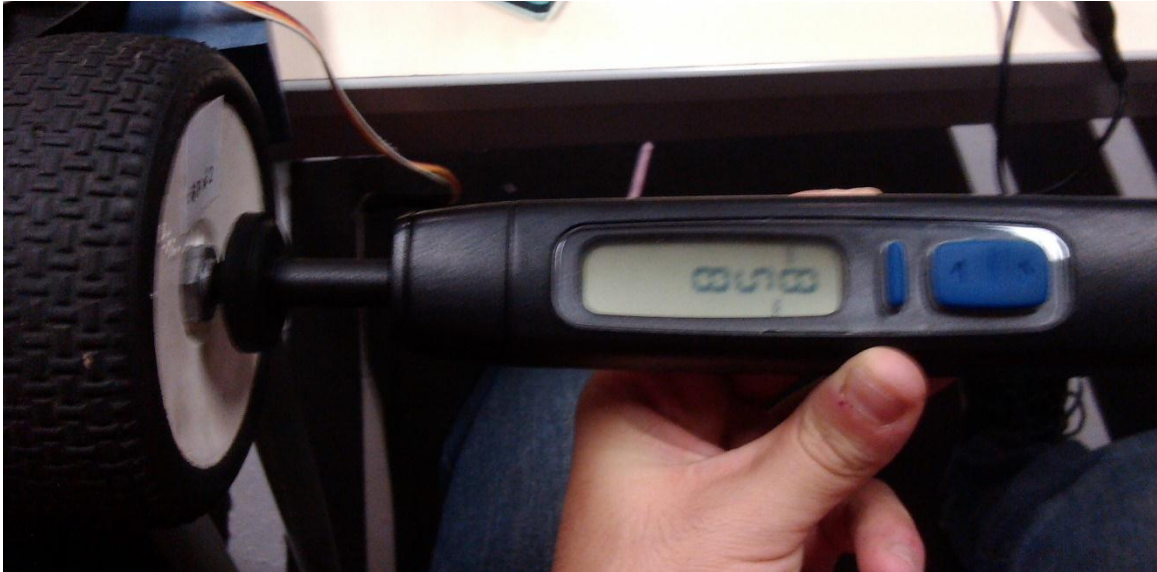


Figura 4.6 - Exemplo de recolha de velocidade angular com o tacómetro.

No capítulo anterior foi descrito o teste onde se calculou a velocidade angular das rodas em vazio. Com a colocação das listas e *encoders* nas rodas, procedeu-se a novos testes para verificar se a leitura efetuada era consistente com os valores previamente medidos. Os resultados desta experiência cumpriram, na sua maioria, com os objetivos. Contudo, houve situações em que o leitor manual (Figura 4.6) registou dados ligeiramente inferiores aos contabilizados pelo *encoder*, tal como se pode verificar no anexo B.3). Esta discrepância pode estar associada ao facto do manómetro operar por encosto com a roda, permitindo assim alguma quebra de fricção entre os dois e, conseqüente, erro na leitura. Verificou-se assim o correto funcionamento do sistema de leitura da velocidade das rodas.

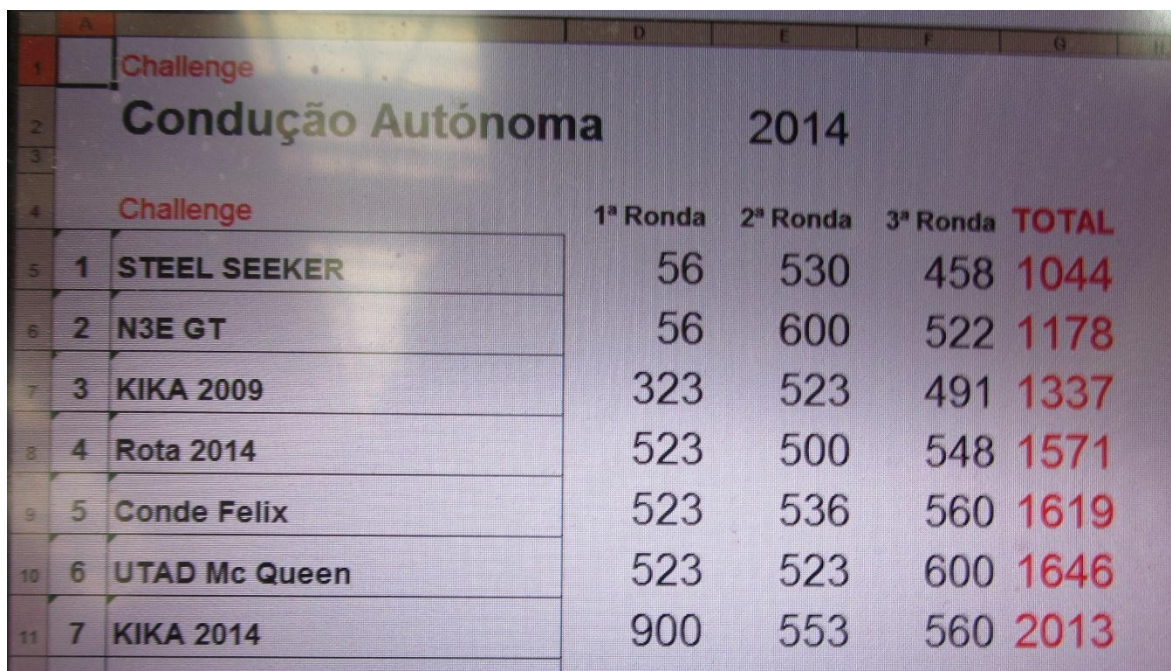
4.6. Resultados preliminares - Participação no Festival Nacional de Robótica

Apesar de ser uma prova prévia à entrega desta tese, este era, sem dúvida, um dos objetivos do projeto. A participação neste evento de prestígio nacional, e a competição com outros grupos, era algo ambicionado. Inicialmente, a candidatura foi registada na classe “rookies”, visto não se considerar que o veículo desenvolvido estivesse preparado para competir na classe superior. Contudo, devido às poucas inscrições na classe

pretendida, esta foi eliminada, sendo então transferida a participação para a classe de maior nível de exigência, a classe “challenge”.

Assim sendo, e apostando na primeira prova para a qual o robô (na competição denominado “STEEL SEEKER”) poderia alcançar um bom resultado, foi feito um esforço para desenvolver soluções *in-loco* de modo a ultrapassar os vários obstáculos que o robô teria de superar. Este foi um processo de desenvolvimento iterativo e muito desafiante dado o tempo limitado e o ambiente de competição.

Após vencer a primeira prova, em igualdade de pontos com o 2º qualificado, foi possível preservar o 1º lugar ao fim da segunda prova, mesmo tendo terminado a mesma na 4º posição. A liderança na tabela classificativa foi consolidada ao fim da terceira prova através de outra finalização em 1º lugar (Figura 4.7), vencendo assim a competição de condução autónoma do CNR.



Challenge		Condução Autónoma 2014			
Challenge		1ª Ronda	2ª Ronda	3ª Ronda	TOTAL
1	STEEL SEEKER	56	530	458	1044
2	N3E GT	56	600	522	1178
3	KIKA 2009	323	523	491	1337
4	Rota 2014	523	500	548	1571
5	Conde Felix	523	536	560	1619
6	UTAD Mc Queen	523	523	600	1646
7	KIKA 2014	900	553	560	2013

Figura 4.7 – Tabela Classificativa do FNR.

5. Conclusões e trabalho futuro

5.1. Conclusões do trabalho realizado

O projeto descrito ao longo deste relatório consiste na construção de raiz de um veículo que, com visão computacional e capacidade sensorial, pode facultar a um sistema inteligente a capacidade de se conduzir ao longo de um qualquer percurso equivalente a uma estrada real, sem qualquer tipo de intervenção ou interferência humana.

Para realizar este projeto considera-se uma divisão em quatro fases distintas: a primeira de desenvolvimento do veículo enquanto conceito, decisão dos acionamentos, equipamentos, sensores e sistemas de processamento bem como escolha e adaptação de sistemas de captura para visão computacional. Esta fase implicou a pesquisa dos sistemas existentes bem como a procura de uma base e componentes adequados.

A segunda fase consistiu na construção geral do robô. Esta incluiu a criação de peças, instalação e adaptação de componentes elétricos e mecânicos, interligação entre sistemas e a programação geral do robô.

Considera-se a terceira fase o momento da competição. Com algum auxílio de uma equipa, houve necessidade de solucionar problemas de programação, eletrónica e mecânica, no momento e com os recursos disponíveis. Este mostrou ser um teste superado, uma vez que no final da competição, a equipa saiu vitoriosa.

Por fim a ultima fase, que consistiria no melhoramento dos sistemas sensoriais não se pode considerar terminada. É também necessário salientar que este robô, sendo construído de raiz, obrigou à aquisição de um conjunto de competências em áreas científicas e técnicas que ficam fora da zona tradicional da engenharia eletrotécnica e que, por isso, apesar de enriquecerem o trabalho, também condicionaram o resultado final.

Em todo o caso, e avaliado o trabalho realizado, considera-se um resultado positivo, com o objetivo principal cumprido.

5.2. Sugestões a trabalhos futuros

Uma vez que o robô em construção foi feito para que houvesse sempre trabalho de continuidade, este terá sempre evoluções pela frente. Este sistema é constituído por elementos e sistemas mecânicos, elétricos e dispositivos programáveis, sendo todas estas componentes podem sempre ser evoluídas.

Entende-se recomendar, como primeiras tarefas a efetuar no futuro, a conclusão do sistema de odometria e a estimativa de posicionamento do robô. O reconhecimento da posição na pista será sem dúvida um complemento importante para a condução. Considera-se também importante uma calibração, no momento imediatamente antes da prova, das condições de luz. Esta dependência cria muitos resultados indesejados aos objetivos definidos para a visão, principalmente na visualização dos semáforos (que, sendo monitores, podem ter interferências por falta de brilho ou excesso de reflexão). As tarefas que completariam o sucesso na prova, tais como a identificação dos sinais de trânsito, completar o desvio de obstáculos e seguir convenientemente a alteração de troço na zona de obras, seria algo que complementaria o trabalho já efetuado.

Colocar em funcionamento o movimento de orientação da camara já iniciado neste projeto, para que o sistema possa seguir o comportamento humano durante a condução, iria permitir visualizar previamente algumas zonas de forma a prever alterações nos seus movimentos. O mesmo sistema também seria útil para auxiliar no estacionamento, e inclusive para identificar a presença de obstáculos com mais facilidade.

Bibliografia

- [1] S. Tsugawa, "Vision-based vehicles in Japan: machine vision systems and driving control systems", *Industrial Electronics, IEEE Transactions*, vol. 41, August 1994, pp. 398 - 405.

- [2] S. Thrun, M. Montemerlo e H. Dahlkamp, "Stanley: The Robot that Won the DARPA Grand Challenge," *Journal of Field Robotics* 23(9), p. 661–692, September 2006.

- [3] R. Murray, J. Burdick e P. Perona, "DARPA Technical Paper: Team Caltech", DARPA Grand Challenge 2005, August 2005.

- [4] MIT Technology Review, "Self-Driving Cars",
"http://www.technologyreview.com/article/429734/self-driving-cars," [Online].

Anexos

A – Regulamentos do FNR relativamente à prova de condução autónoma

Anexo A.1 – Bonificações relativas à identificação de sinais de trânsito

Ação	Bonus (seg.)
1 - Identificar um sinal de trânsito e o tipo	3
2 - Identificar o número do sinal	2
3 - Respeitar a via reservada (*)	10
4 - Não transpor a linha continua central (**)	5
(*) - Não é adicionado à ação 1 e/ou 2 mas necessita que as ações 1 e 2 sejam atingidas	
(**) - Necessita que a ação 3 seja atingida	

Tabela 1 - Tabela de bonificações para a identificação de sinais de trânsito.

Anexo A.2 – Penalizações relativas a infrações

Infração	Pena direta aplicada	Penalização (seg.)
Pequena colisão com acessórios da pista		11
Colisão com acessórios da pista alterando geometria	Tentativa terminada	19
Saída parcial da pista		7
Saída total da pista	Tentativa terminada	23
Direção errada nos painéis de sinalização		25
Não parar no sinal de stop		90
Saída precoce do sinal de stop		90
Parar fora da área de paragem		9
Manobra de estacionamento precoce		19
Manobra de estacionamento não efetuada, efetuada após mais de 30 seg. ou atrasada mais de 2 seg.		23
Manobra de estacionamento irregular (fora de marcações ou interferindo com o obstáculo no estacionamento)		7
Arranque manual nas tentativas		30

Tabela 2 - Tabela de penalizações associadas a infrações

B – Cálculos associados a testes efetuados

Anexo B.1 – Análise de consumos de correntes

Velocidade	Corrente máxima (A)	Corrente média(A)
5	14,4	1,906976744
10	26,8	4,740425532
20	57,6	6,864705882
30	62,8	8,897612732
40	75,2	9,744278607
50	71,6	9,810447761
60	68,8	9,622164948
70	71,6	9,870646766
80	72	9,760714286
Max	75,2	9,870646766

Tabela 3 - Consumos de corrente para diferentes velocidades

Anexo B.2 – Testes de velocidade com tacómetro diretamente aplicado às rodas

Valor inserido	Vel. lida 1	Vel. lida 2	Vel. lida 3	Vel. lida 4	Vel. lida 5	Média por min	Média por seg	
179	-713	-716	-713	-715	-718	-715,0	-11,9	
121	-719	-721	-726	-725	-723	-722,8	-12,0	
116	-604	-603	-601	-604	-603	-603,0	-10,1	
111	-525	-522	-529	-523	-529	-525,6	-8,8	
109	-427	-431	-429	-430	-427	-428,8	-7,1	
106	-312	-311	-311	-309	-305	-309,6	-5,2	
103	-166	-159	-159	-160	-160	-160,8	-2,7	
101	-156	-159	-160	-161	-161	-159,4	-2,7	
100	0	0	0	0	0	0,0	0,0	
86	0	0	0	0	0	0,0	0,0	
85	174	178	178	178	177	177,0	3,0	
84	181	185	183	187	186	184,4	3,1	
82	329	328	331	325	328	328,2	5,5	
80	475	475	475	471	472	473,6	7,9	
78	519	516	529	525	530	523,8	8,7	
75	623	626	609	627	624	621,8	10,4	
70	735	743	740	734	739	738,2	12,3	
65	783	783	778	777	770	778,2	13,0	
60	812	817	810	790	781	802,0	13,4	
55	862	865	867	863	864	864,2	14,4	
45	858	860	863	851	861	858,6	14,3	
5	844	858	857	856	857	854,4	14,2	
						Vel. Min:	-726	-12,1
						Vel. Max:	867	14,45

Tabela 4 - Registro de velocidades medidas com tacómetro

Anexo B.3 – Testes de velocidade para verificação de *encoders* em comparação aos valores lidos com o tacómetro.

Velocidade:	5	Max	Barras:		40	Disparo:		Ambos
Roda:	Frente Esq		Frente Dir		Tras Esq		Tras Dir	
Segundos:	Pulsos	Voltas	Pulsos	Voltas	Pulsos	Voltas	Pulsos	Voltas
0	0	0	0	0	0	0	16	0
1	904	11	919	11	876	10	897	11
2	1050	13	1058	13	1064	13	1066	13
3	1052	13	1060	13	1067	13	1067	13
4	1054	13	1059	13	1067	13	1069	13
5	1055	13	1062	13	1069	13	1068	13
6	1056	13	1063	13	1069	13	1071	13
7	1057	13	1061	13	1070	13	1070	13
8	1061	13	1061	13	1070	13	1072	13
9	1060	13	1058	13	1071	13	1072	13
Tacómetro:		13		12		13		12 - 13

Velocidade:	84	Min	Barras:		40	Disparo:		Ambos
Roda:	Frente Esq		Frente Dir		Tras Esq		Tras Dir	
Segundos:	Pulsos	Voltas	Pulsos	Voltas	Pulsos	Voltas	Pulsos	Voltas
0	0	0	1	0	0	0	1	0
1	163	2	275	3	12	0	307	3
2	221	2	375	4	123	1	393	4
3	213	2	385	4	248	3	392	4
4	202	2	382	4	320	4	394	4
5	204	2	386	4	368	4	394	4
6	204	2	391	4	372	4	394	4
7	231	2	390	4	374	4	393	4
8	256	3	391	4	375	4	393	4
9	276	3	392	4	376	4	394	4
Tacómetro:		2 - 3		4		4		4

Tabela 5 - Testes comparativos de leitura por tacómetro e por *encoders*.

Anexo B.4 – Teste de recolha de valor de ADC para cada posição de sinal PWM enviado:

PWM	Sentido horário					Sentido anti-horário					Média	Recebido	Dif Max	Função	Dif Max
	1º	2º	3º	4º	5º	1º	2º	3º	4º	5º					
0	108	84	107	84	108	84	84	84	108	84	93,5	94	14		
1	84	84	110	84	84	85	85	84	109	85	89,4	89	21		
2	84	84	110	84	84	85	85	85	85	85	87,1	87	23		
3	84	84	111	85	85	85	85	85	85	85	87,4	87	24		
4	86	87	86	86	86	88	87	87	87	88	86,8	87	1	87	1
5	88	88	88	88	88	89	88	89	89	88	88,3	88	1	89	1
6	90	90	89	89	89	90	89	90	91	90	89,7	90	1	90	1
7	91	92	92	93	91	92	91	91	91	92	91,6	92	1	92	1
8	93	93	93	93	93	93	93	93	93	93	93	93	0	94	1
9	94	95	95	94	94	94	95	94	95	94	94,4	94	1	95	1
10	96	96	96	96	95	96	96	96	96	96	95,9	96	1	97	2
11	98	97	98	97	98	98	98	98	98	99	97,9	98	1	98	1
12	99	99	100	99	100	100	99	100	99	100	99,5	100	1	100	1
13	100	101	100	101	101	102	101	101	101	102	101	101	1	102	2
14	102	102	102	102	103	103	103	103	103	103	102,6	103	1	103	1
15	104	104	104	105	105	105	104	104	105	105	104,5	105	1	105	1
16	106	105	106	106	106	106	106	106	106	106	105,9	106	1	107	2
17	107	108	107	107	107	108	107	108	108	108	107,5	108	1	108	1
18	109	109	109	109	109	109	109	109	110	109	109,1	109	1	110	1
19	110	110	111	111	111	111	111	111	111	111	110,8	111	1	112	2
20	113	112	112	112	113	113	113	113	113	113	112,7	113	1	113	1
21	115	113	115	114	113	115	114	114	114	115	114,2	114	1	115	2
22	116	116	116	116	116	116	116	116	116	116	116	116	0	116	0
23	118	118	118	117	118	118	118	118	118	118	117,9	118	1	118	1
24	119	119	119	119	120	119	120	119	120	120	119,4	119	1	120	1
25	121	120	121	121	120	121	122	121	121	121	120,9	121	1	121	1
26	122	123	123	122	123	123	123	123	123	123	122,8	123	1	123	1
27	125	124	124	125	124	124	125	124	125	125	124,5	125	1	125	1
28	126	126	126	125	126	126	126	126	126	126	125,9	126	1	126	1
29	128	128	128	128	127	128	128	129	128	128	128	128	1	128	1
30	129	129	129	129	129	130	130	130	130	130	129,5	130	1	130	1
31	131	131	131	131	130	132	131	132	131	131	131,1	131	1	131	1
32	132	132	132	132	133	133	133	133	133	133	132,6	133	1	133	1
33	134	134	134	135	134	135	135	135	134	134	134,4	134	1	134	1
34	136	136	136	136	135	136	136	136	136	136	135,9	136	1	136	1
35	138	138	138	137	138	138	138	138	138	138	137,9	138	1	138	1
36	139	139	139	140	140	140	140	139	139	140	139,5	140	1	139	1
37	140	140	141	140	140	141	142	142	141	141	140,8	141	1	141	1
38	142	142	143	142	142	143	143	143	143	142	142,5	143	1	143	1

39	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	0	144	0
40	146	145	146	145	146	146	146	146	146	146	145,8	146	1	146	1
41	147	147	147	147	147	148	148	147	147	148	147,3	147	1	148	1
42	148	149	148	149	149	149	149	149	149	150	148,9	149	1	149	1
43	150	150	151	151	151	151	151	151	151	151	150,8	151	1	151	1
44	152	152	152	152	151	152	152	153	153	153	152,2	152	1	152	1
45	154	154	153	154	154	154	155	155	154	154	154,1	154	1	154	1
46	155	155	155	155	155	156	156	156	156	156	155,5	156	1	156	1
47	157	157	157	157	157	157	158	158	158	158	157,4	157	1	157	1
48	159	159	158	158	159	159	159	159	159	159	158,8	159	1	159	1
49	160	160	160	160	161	161	161	161	161	161	160,6	161	1	161	1
50	161	162	161	162	162	162	162	162	163	162	161,9	162	1	162	1
51	163	163	163	164	163	164	164	164	164	164	163,6	164	1	164	1
52	165	165	165	165	165	166	166	166	166	166	165,5	166	1	166	1
53	167	166	166	166	167	167	168	167	167	168	166,9	167	1	167	1
54	168	168	169	168	169	169	169	169	169	169	168,7	169	1	169	1
55	170	170	170	170	170	171	171	171	171	171	170,5	171	1	170	1
56	172	172	172	171	172	172	172	172	172	172	171,9	172	1	172	1
57	173	173	173	173	174	174	174	174	174	174	173,6	174	1	174	1
58	175	175	175	175	175	176	176	175	176	176	175,4	175	1	175	1
59	177	177	177	176	177	178	177	177	177	178	177,1	177	1	177	1
60	178	178	178	178	178	179	179	179	179	179	178,5	179	1	179	1
61	180	180	180	180	180	181	180	181	181	181	180,4	180	1	180	1
62	181	182	182	182	182	182	182	182	182	182	181,9	182	1	182	1
63	183	183	184	183	183	184	183	184	184	184	183,5	184	1	184	1
64	185	185	185	185	185	185	186	185	185	185	185,1	185	1	185	1
65	187	186	186	186	187	187	187	187	187	187	186,7	187	1	187	1
66	188	188	189	188	188	189	189	189	189	189	188,6	189	1	188	1
67	190	190	189	190	190	190	190	191	190	191	190,1	190	1	190	1
68	192	191	191	192	191	192	191	192	192	192	191,6	192	1	192	1
69	193	193	193	194	193	194	194	193	194	194	193,5	194	1	193	1
70	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	0	195	0
71	196	196	196	197	196	197	197	197	197	197	196,6	197	1	197	1
72	199	197	198	198	198	198	199	199	199	199	198,4	198	1	198	1
73	200	199	200	200	200	200	200	200	200	201	200	200	1	200	1
74	201	201	201	201	202	202	202	202	202	202	201,6	202	1	202	1
75	203	203	203	203	202	203	203	204	204	203	203,1	203	1	203	1
76	204	205	205	204	205	205	205	206	206	205	205	205	1	205	1
77	206	206	207	206	206	207	207	207	207	207	206,6	207	1	206	1
78	208	208	208	208	208	209	208	209	209	209	208,4	208	1	208	1
79	209	210	210	210	210	210	210	210	210	210	209,9	210	1	210	1
80	211	211	211	211	211	211	211	212	212	212	211,3	211	1	211	1
81	213	213	213	213	213	214	214	214	214	213	213,4	213	1	213	1
82	215	215	214	214	215	215	216	215	215	215	214,9	215	1	215	1
83	216	216	216	216	216	216	217	217	217	217	216,4	216	1	216	1

84	217	217	218	217	217	218	218	218	218	218	217,6	218	1	218	1
85	219	220	219	220	220	220	221	220	220	220	219,9	220	1	220	1
86	221	221	221	221	221	222	222	222	222	222	221,5	222	1	221	1
87	223	223	223	223	223	223	224	223	223	224	223,2	223	1	223	1
88	224	224	224	224	224	225	225	225	225	225	224,5	225	1	224	1
89	226	226	226	226	226	227	227	226	227	226	226,3	226	1	226	1
90	228	228	228	228	228	228	228	228	228	229	228,1	228	1	228	1
91	229	229	229	229	229	230	230	230	231	230	229,6	230	1	229	2
92	230	231	230	231	231	232	232	232	232	232	231,3	231	1	231	1
93	232	232	232	232	232	233	234	233	234	233	232,7	233	1	233	1
94	234	234	234	234	235	236	235	235	235	235	234,7	235	1	234	2
95	236	236	235	236	235	237	236	236	237	237	236,1	236	1	236	1
96	238	237	238	238	237	238	238	238	238	238	237,8	238	1	238	1
97	239	239	239	239	239	240	240	240	240	240	239,5	240	1	239	1
98	241	241	241	241	241	241	241	242	242	241	241,2	241	1	241	1
99	242	242	242	243	242	243	243	243	243	243	242,6	243	1	242	1
100	244	243	244	244	244	245	245	245	245	245	244,4	244	1	244	1
101	246	246	246	245	245	246	246	246	246	246	245,8	246	1	246	1
102	248	247	247	248	248	248	248	248	248	248	247,8	248	1	247	1
103	250	249	249	249	249	250	250	250	250	249	249,5	250	1	249	1
104	250	250	251	250	251	251	252	251	251	251	250,8	251	1	251	1
105	252	252	252	252	252	253	253	253	253	253	252,5	253	1	252	1
106	254	254	254	254	254	254	254	255	254	254	254,1	254	1	254	1
107	256	255	256	256	255	256	256	256	256	256	255,8	256	1	256	1
108	257	257	257	257	257	258	258	257	258	257	257,3	257	1	257	1
109	258	258	259	259	259	259	259	259	259	260	258,9	259	1	259	1
110	260	260	260	260	260	261	261	262	261	261	260,6	261	1	260	2
111	262	263	262	261	261	262	262	262	263	263	262,1	262	1	262	1
112	263	263	263	263	264	264	265	264	265	264	263,8	264	1	264	1
113	266	265	266	265	265	266	266	266	266	266	265,7	266	1	265	1
114	267	267	267	267	267	268	268	268	268	267	267,4	267	1	267	1
115	268	269	268	268	269	269	269	269	269	269	268,7	269	1	269	1
116	270	270	270	270	271	271	270	271	271	270	270,4	270	1	270	1
117	272	272	272	271	272	272	272	273	273	272	272,1	272	1	272	1
118	273	274	273	273	274	274	274	274	274	274	273,7	274	1	274	1
119	275	275	275	275	275	276	276	276	276	276	275,5	276	1	275	1
120	277	277	277	277	277	278	277	277	277	278	277,2	277	1	277	1
121	279	278	278	278	278	279	279	280	279	279	278,7	279	1	278	2
122	280	280	280	280	280	281	280	281	281	280	280,3	280	1	280	1
123	282	282	281	282	281	282	283	282	283	282	282	282	1	282	1
124	283	284	283	283	284	284	283	284	284	284	283,6	284	1	283	1
125	285	285	285	285	285	285	285	286	285	286	285,2	285	1	285	1
126	287	286	287	287	287	287	287	287	288	287	287	287	1	287	1
127	288	288	288	288	288	289	288	289	289	289	288,4	288	1	288	1
128	290	290	290	291	290	291	291	290	290	290	290,3	290	1	290	1

129	291	292	292	292	291	292	292	292	292	292	291,8	292	1	292	1
130	293	293	293	294	294	294	294	294	294	294	293,7	294	1	293	1
131	294	295	294	295	295	295	295	295	296	295	294,9	295	1	295	1
132	296	296	297	296	297	297	297	297	297	298	296,8	297	1	296	2
133	299	298	298	298	298	299	299	299	299	298	298,5	299	1	298	1
134	300	299	300	300	300	300	300	300	300	300	299,9	300	1	300	1
135	302	301	302	302	302	302	302	302	302	302	301,9	302	1	301	1
136	303	303	303	303	303	303	304	303	304	303	303,2	303	1	303	1
137	304	305	305	304	304	305	305	305	305	305	304,7	305	1	305	1
138	306	306	306	306	306	306	307	306	307	306	306,2	306	1	306	1
139	308	308	308	308	308	308	309	308	308	308	308,1	308	1	308	1
140	309	309	309	309	309	310	310	310	309	310	309,4	309	1	310	1
141	311	311	311	311	311	312	311	311	311	311	311,1	311	1	311	1
142	313	313	313	313	313	313	313	313	313	313	313	313	0	313	0
143	315	314	314	314	314	315	315	315	315	314	314,5	315	1	314	1
144	316	315	316	316	316	316	316	316	316	316	315,9	316	1	316	1
145	318	318	318	318	318	318	318	318	318	318	318	318	0	318	0
146	319	319	319	319	320	320	320	320	320	319	319,5	320	1	319	1
147	321	321	321	321	321	321	321	321	321	321	321	321	0	321	0
148	322	323	322	323	323	322	323	323	323	323	322,7	323	1	323	1
149	324	324	324	324	324	325	324	325	325	325	324,4	324	1	324	1
150	326	326	326	325	325	326	326	326	326	326	325,8	326	1	326	1
151	327	328	327	327	328	328	327	328	327	328	327,5	328	1	328	1
152	329	330	329	329	329	329	329	330	329	329	329,2	329	1	329	1
153	330	331	331	331	331	331	330	331	331	331	330,8	331	1	331	1
154	332	332	333	332	332	333	332	332	333	333	332,4	332	1	332	1
155	334	334	334	334	334	334	334	334	335	334	334,1	334	1	334	1
156	335	335	335	335	335	335	336	335	336	336	335,3	335	1	336	1
157	337	337	337	337	337	337	337	337	338	337	337,1	337	1	337	1
158	339	339	339	339	339	339	339	339	338	340	339	339	1	339	1
159	340	340	340	341	340	341	341	340	341	341	340,5	341	1	341	1
160	342	342	342	343	342	343	343	342	342	343	342,4	342	1	342	1
161	344	344	344	344	344	343	344	344	344	344	343,9	344	1	344	1
162	345	345	345	346	346	345	346	346	345	346	345,5	346	1	346	1
163	347	347	347	347	347	347	348	347	348	347	347,2	347	1	347	1
164	349	349	349	349	349	349	349	349	349	349	349	349	0	349	0
165	351	350	350	350	350	351	351	351	351	351	350,6	351	1	350	1
166	352	352	353	352	352	352	353	352	352	353	352,3	352	1	352	1
167	354	353	354	353	353	354	354	354	354	354	353,7	354	1	354	1
168	355	355	356	355	355	356	356	356	356	356	355,6	356	1	355	1
169	357	357	357	357	357	357	357	357	357	357	357	357	0	357	0
170	358	359	359	358	358	358	359	359	359	359	358,6	359	1	359	1
171	360	360	360	360	360	361	361	360	361	360	360,3	360	1	360	1
172	361	362	362	362	362	362	362	362	362	362	361,9	362	1	362	1
173	364	363	364	364	364	364	363	364	364	364	363,8	364	1	364	1

174	365	365	365	366	366	365	365	365	365	365	365,2	365	1	365	1
175	367	367	367	367	367	367	367	367	367	367	367	367	0	367	0
176	368	368	368	368	368	369	368	368	369	369	368,3	368	1	368	1
177	370	370	370	370	370	370	370	370	370	371	370,1	370	1	370	1
178	372	371	371	371	372	372	372	372	372	372	371,7	372	1	372	1
179	373	373	373	374	374	373	373	374	373	374	373,4	373	1	373	1
180	375	375	375	375	376	375	375	375	376	375	375,2	375	1	375	1
181	376	375	375	375	375	376	375	376	375	375	375,3	375	1		
182	375	375	375	375	375	376	375	376	376	375	375,3	375	1		
183	375	376	376	375	375	376	375	375	375	375	375,3	375	1		
184	375	376	375	375	375	376	375	375	375	375	375,2	375	1		
185	375	375	375	375	375	375	375	375	375	375	375	375	0		
186	375	375	375	375	375	375	375	375	375	375	375	375	0		
187	376	375	375	375	375	375	375	375	375	375	375,1	375	1		
188	375	375	375	376	375	375	376	375	376	375	375,3	375	1		
189	375	375	375	375	375	375	375	375	375	376	375,1	375	1		
190	375	375	375	375	375	375	375	375	375	375	375	375	0		

Tabela 6 - Correspondência entre sinal emitido em PWM e sinal recebido pelo ADC