

LEANDRO DE BRITO LEITE

MÓDULO SENSOR DE MOVIMENTO E POSICIONAMENTO INTEGRADO À REDE CAN

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Escola de Engenharia de
São Carlos, da Universidade de São
Paulo

Curso de Engenharia da Computação

ORIENTADOR: Evandro Luis Linhari Rodrigues

São Carlos
2012

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Atendimentos ao Usuário do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

L533m Leite, Leandro de Brito.
Módulo sensor de movimento e posicionamento integrado à rede CAN. / Leandro de Brito Leite; orientador Evandro Luis Linhari Rodrigues. -- São Carlos, 2012.

Monografia (Graduação em Engenharia da Computação) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2012.

1. GPS. 2. Formula SAE. 3. Telemetria. 4. Acelerômetro. 5. Giroscópio. 6. CAN. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Leandro de Brito Leite

Título: "Módulo Sensor de Movimento e Posicionamento Integrado à Rede CAN"

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado
em 17/02/2012,

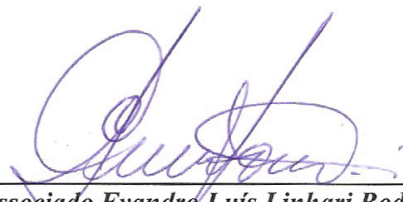
com NOTA 8,0 (oito, zero), pela comissão julgadora:



Prof. Dr. Marcelo Andrade da Costa Vieira - SEL/EESC/USP



Prof. Maximilian Luppe - SEL/EESC/USP



Prof. Associado Evandro Luís Linhari Rodrigues
Coordenador pela EESC/USP do
Curso de Engenharia de Computação

Agradecimentos

Ao professor Evandro Luis Linhari Rodrigues, pela oportunidade e orientação na elaboração deste trabalho.

Aos professores Maximilian Luppe e Marcelo Vieira, por colaborar com a formação acadêmica necessária para a conclusão deste projeto.

Ao Eng. Dr. Carlos Eduardo Milhor, pelos ensinamentos e constante apoio ao crescimento acadêmico e profissional.

À equipe *Solid Edge* EESC-USP de Formula SAE, pelo suporte técnico e pelos constantes desafios, que agregaram conhecimento e projetos de sucesso.

Aos amigos Renato Beltrame Franchetti, André Luis Lui, Luciano Falqueto Santana, Thiago Pinheiro e José Ernesto, pelo apoio, motivação e ajuda na conclusão deste projeto.

À minha família, pelo suporte e apoio constante.

Epígrafe

“O sucesso resulta de cem pequenas coisas feitas de forma um pouco melhor. O insucesso, de cem pequenas coisas feitas de forma um pouco pior.”

Henry Kissinger

Sumário

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS	17
2	EMBASAMENTO TEÓRICO.....	18
2.1	<i>Controller Area Network (CAN)</i>	18
2.2	Forças atuantes em um veículo.....	21
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	23
3.1	Eletrônica.....	25
3.1.1	Alimentação	25
3.1.2	Microcontrolador	26
3.1.3	Conversor A/D	27
3.1.4	Filtro passa-baixa.....	28
3.1.5	Acelerômetro	29
3.1.6	Giroscópio	30
3.1.7	GPS.....	31
3.1.8	Montagem do <i>hardware</i> em matriz de contatos	33
3.1.9	Montagem do <i>hardware</i> em placa de circuito impresso universal.....	34
3.2	Programação do Microcontrolador	36
3.2.1	Plataforma de Programação e Gravação	36
3.2.2	Processamento digital do sinal	36
3.2.3	Organização das mensagens CAN.....	36
3.2.4	Programação	38
3.3	Interface com o computador.....	40
3.3.1	<i>Sniffer</i>	40
3.3.2	<i>Software</i> de interface com o computador	41

3.3.3	Formato do arquivo de dados gerado pelo programa	42
3.3.4	<i>Software</i> para leitura e análise dos dados.....	43
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	44
4.1	Precisão da leitura A/D.....	44
4.2	Ruídos na leitura A/D	44
4.3	Calibração	46
4.4	Testes em um veículo de passeio.....	47
4.4.1	Teste de aceleração e frenagem.....	48
4.4.2	Teste de <i>Skid Pad</i>	51
4.4.3	Teste de <i>Slalom</i>	52
4.5	Discussões	54
5	CONCLUSÕES	55
1	Custo dos Materiais.....	59
2	Esquemático de <i>Hardware</i>	60

Lista de Figuras

Figura 1 - Veículo da equipe <i>Solid Edge</i> EESC-USP de Formula SAE.	16
Figura 2 - Esquema elétrico do veículo de Formula SAE da equipe <i>Solid Edge</i> EESC-USP antes da instalação de rede CAN.....	18
Figura 3 - Esquema elétrico do veículo de Formula SAE da equipe <i>Solid Edge</i> EESC-USP após a instalação de rede CAN.	20
Figura 4 - Eixos de coordenadas de um veículo, adotados pela indústria automotiva (Gillespie, 1992).	21
Figura 5 - Ilustração de um veículo com comportamento <i>understeer</i> (esquerda) e <i>oversteer</i> (direita).....	22
Figura 6 - Diagrama de blocos do sistema.....	23
Figura 7 - Montagem de todo o sistema.	24
Figura 8 - Bateria da marca Unipower. Tensão de 6 Volts e capacidade de 4,5Ah.	25
Figura 9 - Microcontrolador Microchip PIC18F2680, encapsulado no formato PDIP com 28 pinos.	26
Figura 10 - Circuito elétrico usado como filtro passa-baixa.....	28
Figura 11 - Acelerômetro Freescale MMA7341L.....	29
Figura 12 - Giroscópio LPY503AL, da ST Microelectronics.	30
Figura 13 - Receptor GPS da Locosys, frente e verso.....	31
Figura 14 - Descrição do <i>frame</i> de mensagem RMC.	32
Figura 15 - Montagem do <i>hardware</i> inicial na matriz de contatos, gravador PICKit3 (acima) e módulo conversor <i>Sniffer</i> (à esquerda).....	33
Figura 16 - <i>Hardware</i> montado em placa de circuito impresso universal.	34
Figura 17 - Fluxograma do código principal do microcontrolador.....	39
Figura 18 - Funcionamento do módulo <i>Sniffer</i>	40
Figura 19 - Tela do programa de interface entre o barramento CAN e o computador.	41
Figura 20 - Tela do <i>software</i> leitor de análise dos dados.	43
Figura 21 - Ilustração da calibração dos eixos do acelerômetro.	47

Figura 22 - Módulo sensor fixado no painel do carro, nivelado a partir do aplicativo Carpenter para iPhone.....	48
Figura 23 - Montagem do sistema em um veículo de passeio, com o propósito de testar seu funcionamento.	48
Figura 24 - Análise do teste de aceleração e frenagem. Momento logo após a saída.	49
Figura 25 - Análise do teste de aceleração e frenagem. Momento de frenagem máxima.	50
Figura 26 - Circuito de <i>skid pad</i>	51
Figura 27 - Análise de teste de <i>skid pad</i> . Momento de máxima aceleração lateral.	51
Figura 28 – Cones formando um circuito de <i>slalom</i>	52
Figura 29 - Análise do teste de <i>slalom</i> . Momento de aceleração lateral máxima...52	
Figura 30 - Análise do teste de <i>slalom</i> . Foco na rolagem do veículo.	53
Figura 31 - Esquemático do <i>hardware</i> final.....	60

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Mensagens que são trocadas com o módulo através do barramento CAN.....	37
Tabela 2 - Valores de tensão medidos pelo multímetro e pelo microcontrolador...44	
Tabela 3 - Ruído gerado nos três tipos de filtros testados.	45
Tabela 4 - Preços de componente e estimativa do total gasto em um módulo.....	59

Abreviações

SAE – *Society of Automotive Engineers*

CAN – *Controller Area Network*

PCB – *Printed Circuit Board*

4WS – *Four Wheel Steering*

ABS – *Anti-lock Braking System*

ICSP - *In-Circuit Serial Programming*

Resumo

A eletrônica automotiva evoluiu nas últimas duas décadas e hoje se faz presente na maioria dos carros de passeio, aumentando seu controle e confiabilidade, e reduzindo os danos ao meio ambiente. A utilização de sensores e módulos de processamento também é importante em carros de corrida e equipes de competição, por coletarem informações que permitem avaliar o projeto e analisar o desempenho do veículo em pista, permitindo ajustes e melhorias que podem resultar em futuras vitórias. A equipe *Solid Edge* EESC-USP de Formula SAE projeta e constrói um protótipo de carro de corridas que participa de competições universitárias, e possui essa necessidade de um sistema de aquisição de dados. Neste trabalho foi desenvolvido um módulo eletrônico capaz de medir a posição e o movimento do veículo, através de acelerômetro, giroscópio e receptor GPS. As informações são disponibilizadas via interface CAN e são usadas para medição e avaliação da dinâmica veicular de um carro de Formula SAE ou um automóvel de passeio. Também foram desenvolvidos neste trabalho dois *softwares* em LabVIEW, um de interface com o barramento CAN para leitura das informações no computador, e um para análise destas informações. O módulo desenvolvido foi calibrado em bancada e foram realizados testes em um veículo de passeio, verificando-se que as grandezas medidas foram coerentes com as ações executadas no automóvel. O sistema será instalado no carro protótipo da equipe de Formula SAE da EESC-USP para futuros testes e avaliações do projeto.

Palavras-chave: Formula SAE, Telemetria, GPS, Acelerômetro, Giroscópio, CAN.

Abstract

The automotive electronics has evolved over the past two decades and today is present in most cars, increasing their control and reliability, and reducing environmental damage. Sensors and processing modules is also important in racing cars and racing teams, for collecting information to assess the project and analyze the performance of the vehicle on the track, allowing adjustments and improvements that can lead to future victories. The team Solid Edge EESC-USP of Formula SAE design and build a prototype race car that participates in university competitions, and has the same need for data acquisition systems. In this work, an electronic module was developed, capable of measuring the position and movement of the vehicle, via the accelerometer, gyroscope and GPS receiver. Information is available via CAN interface and are used for measurement and evaluation of vehicle dynamics of a Formula SAE or a passengers car. In this work, also two softwares based in LabVIEW were developed, an interface to the CAN bus for reading the information on the computer, and one used to do the analysis of this information. The developed module was calibrated in bench, and tests were performed on field, in a passenger vehicle. The measures were consistent with the actions taken in the car. The system will be installed on the prototype car of Formula SAE team of EESC-USP for future testing and evaluation of the project.

Keywords: Formula SAE, Telemetry, GPS, Accelerometer, Gyroscope, CAN.

1 INTRODUÇÃO

Desde o início da década de 90 a eletrônica automotiva vem tomando espaço nos automóveis, promovendo a melhora de seu desempenho e de seu controle. Esse crescimento é sustentado pelas montadoras de automóveis, que procuram atender a demanda de seus clientes e do governo por sistemas confiáveis, seguros e menos danosos ao meio ambiente.

Controle, monitoramento e exibição de informações, antes feitos manual ou mecanicamente passaram a ser feitos por sensores e sistemas processados por computador. Algumas dessas funcionalidades incluem controle do motor, chassi, segurança e diagnóstico de problemas (Nwagboso, 1993).

Além das montadoras, a instalação de sensores e módulos de processamento também é muito importante em carros de corrida e equipes de competição. Quando pronto, um carro de competição deve ser testado, avaliado e ajustado para melhorar seu desempenho na pista. Uma vez que a equipe tem um total entendimento dos instrumentos e eles estão corretamente instalados no veículo é possível completar vários testes e ajustes em um curto período de tempo (Milliken, 1995).

A informação é uma das armas mais importantes de uma equipe de corridas de automóveis. Quanto mais ela puder recolher e processar, melhor o julgamento que fará quando precisar tomar decisões importantes. Essas informações são obtidas e armazenadas por um sistema chamado de aquisição de dados ou *Data Logger* (Segers, 2008).

Atualmente, quase todo carro de corrida é equipado com uma unidade de aquisição de dados, capaz de medir quase todos os parâmetros do veículo e do piloto. Essas medidas podem ser usadas para avaliar mudanças nos ajustes, condições de pista, causas de variação de desempenho e falhas de componentes. Com a diminuição do custo de eletrônica, sistemas que antes eram usados somente por equipes de ponta agora custam menos que um pneu de corridas (Segers, 2008).

Atualmente a empresa *McLaren Electronics* possui os equipamentos mais avançados de aquisição de dados, fornecendo produtos para grandes competições de automóveis, incluindo a Formula 1. Seus módulos possuem dezenas de canais de aquisição, capazes de realizar 400 mil amostras por segundo. Além disso, possuem uma grande variedade de interfaces, como *Ethernet*, RS232, *FlexRay* e CAN.

No contexto de corridas de automóveis, a equipe *Solid Edge* EESC-USP de Formula SAE é um grupo formado por estudantes de engenharia da Escola de Engenharia de São Carlos, com o objetivo de projetar e construir, a cada ano, um protótipo de carro de corridas para uma pessoa. Um dos veículos já construídos pode ser visto na figura 1.



Figura 1 - Veículo da equipe *Solid Edge* EESC-USP de Formula SAE.

A equipe participa de competições universitárias, nas quais o protótipo construído é avaliado tanto do ponto de vista da engenharia quanto do seu desempenho em pista. Ao longo de sua história, a equipe já foi campeã de duas competições nacionais, venceu várias provas de projeto e recebeu dois prêmios de inovação tecnológica, pelo uso de telemetria e rede CAN.

A cada ano, os pontos fortes e fracos do veículo são analisados, e seu projeto é refeito a fim de se obter uma constante melhoria. Para realizar essa análise, há a necessidade de quantificar e avaliar o desempenho do mesmo, de um modo mais objetivo e preciso do que as percepções do piloto ou de um espectador externo.

Portanto, assim como equipes de ponta, é necessário o uso de sistemas de aquisição de dados para avaliação, ajustes e desenvolvimento do veículo. Contribuindo com a evolução não só do projeto, mas também com a formação dos estudantes que o fazem.

1.1 OBJETIVOS

Este trabalho apresenta o projeto e construção de um módulo eletrônico sensor de posição e movimento, que utiliza comunicação baseada em protocolo CAN, para medição e avaliação da dinâmica veicular de um carro de Formula SAE ou automóveis de passeio.

O sistema é constituído de um microcontrolador, um acelerômetro de três eixos, um giroscópio de dois eixos e sensor de posição por GPS. Todos os sinais adquiridos são formatados em pacotes e enviados ao barramento CAN, permitindo que outras unidades eletrônicas tenham acesso às informações ou que elas sejam visualizadas, por exemplo, em um computador. Também faz parte do projeto um programa construído em LabVIEW para interface entre o módulo e um computador, que possibilita a visualização e gravação das informações.

Realizaram-se testes de funcionamento e desempenho em bancada, e testes de campo em um carro de passeio. Os resultados obtidos permitiram a avaliação de desempenho do veículo.

2 EMBASAMENTO TEÓRICO

2.1 *Controller Area Network (CAN)*

Nos anos 70 e 80 a complexidade de eletrônica usada nos automóveis cresceu consideravelmente, com sistemas de controle de motor, freios ABS, suspensão ativa, transmissão eletrônica, ar condicionado, segurança. Cada um desses itens faz parte de um todo integrado, sendo que uma quantidade considerável de informações precisa ser compartilhada e alguns meios de interconexão precisam ser usados. O método convencional usava ligação ponto-a-ponto por meio de fios, conectando cada sensor ao seu subsistema, ou um subsistema a outro. Com o crescimento da complexidade dos sistemas e do número de sensores esse método se tornou inadequado, pois cada carro precisaria de quilômetros de fiação e vários conectores, que adicionariam peso, manutenção e custos aos automóveis (Catsoulis, 2003).

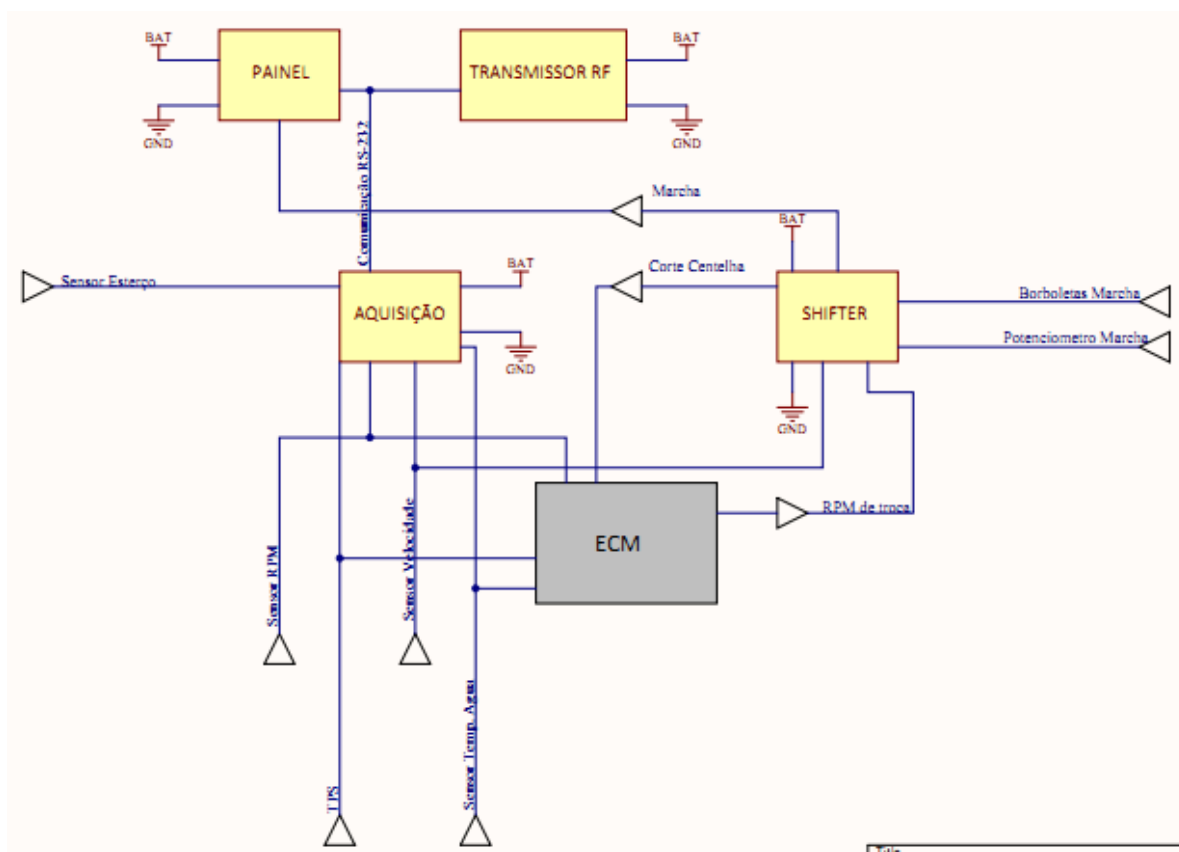


Figura 2 - Esquema elétrico do veículo de Fórmula SAE da equipe *Solid Edge EESC-USP* antes da instalação de rede CAN.

Um exemplo da ligação ponto-a-ponto é mostrado na figura 2, que representa o esquema elétrico do veículo de Formula SAE da equipe *Solid Edge* EESC-USP antes da instalação de rede CAN. Pode-se notar que, caso dois módulos necessitem do mesmo sensor, é necessário dividir o sinal em um ou mais fios, o que pode causar variâncias na sua leitura. A comunicação entre módulos, feita através do protocolo RS232, também fica restrita a duas unidades que se comunicam somente entre si.

A solução para esse aumento da complexidade dos sistemas eletrônicos automotivos foi simplificar as ligações, implementando uma rede digital de intercomunicação de baixo custo, resistente ao ambiente ruidoso do automóvel, detecção de erros e retransmissão de pacotes. Nasceu então a CAN, *Controller Area Network*, a qual suporta mestres múltiplos na rede, cada um responsável por sensoriamento local e controle de um sistema distribuído.

O protocolo de comunicação serial digital CAN promove a interconexão e troca de informações entre módulos eletrônicos, que podem ser de controle ou simplesmente de aquisição de dados. Este protocolo é geralmente usado em automóveis, e segundo Sakai (2008) suas principais características são:

- Rede multimestre: o barramento pode ser utilizado por qualquer nó da rede, desde que esteja livre;
- Taxa de comunicação de até 1 Mbps;
- O frame de dados pode conter até 8 *Bytes* de informação;
- Possibilidade de adição, remoção e mudança de dispositivos no barramento.

O barramento CAN utilizado no veículo de Formula SAE possui quatro fios, CAN *High* (CAN_H), CAN *Low* (CAN_L), alimentação (12 Volts) e referência (GND). Os fios CAN_H e CAN_L devem ser trançados e não blindados. Os dados são enviados através da rede e interpretados segundo a análise da diferença de potencial entre esses dois fios, por isso o barramento é classificado como par trançado diferencial. Este conceito atenua fortemente os efeitos causados por interferências eletromagnéticas, tornando o sistema ideal para uso em veículos e ambientes de alto ruído.

As mensagens CAN possuem diversos campos definidos. Para o usuário os campos importantes são os de identificação, ou ID, DLC (*Data Length Code*) e o campo de dados, que envia de 0 a 8 *bytes* de informação por mensagem. Os outros campos são usados pelo protocolo para localização dos campos, checagem de erro e tipo do frame.

O campo ID contém informações como sua prioridade, seu tipo, e endereços de origem e destino. O campo DLC indica o número de *Bytes* contidos no campo de dados. O campo de dados é contido por 64 *bits*, divididos em 8 *Bytes*. Estes *Bytes* podem conter uma informação, várias informações ou parte de uma informação ainda maior.

Ciente dessas vantagens do barramento CAN, a equipe de Formula SAE decidiu desenvolver uma rede CAN para seu veículo, por diminuir o cabeamento, aumentar a confiabilidade, e ir de encontro com um dos objetivos da equipe, a inovação tecnológica visando a melhoria de desempenho do veículo (Casagrande, 2009).

Na figura 3 é possível observar a simplicidade e a clareza do sistema após a instalação da rede CAN. Cada sensor é ligado a um módulo, geralmente o mais próximo, que transforma sua informação em um pacote e o envia no barramento, disponibilizando-a para todas as outras unidades conectadas. Assim evita-se a divisão do sinal entre diferentes unidades, e diminui-se o comprimento dos fios que percorrem o veículo, sendo somente necessários os quatro fios responsáveis pelo barramento CAN.

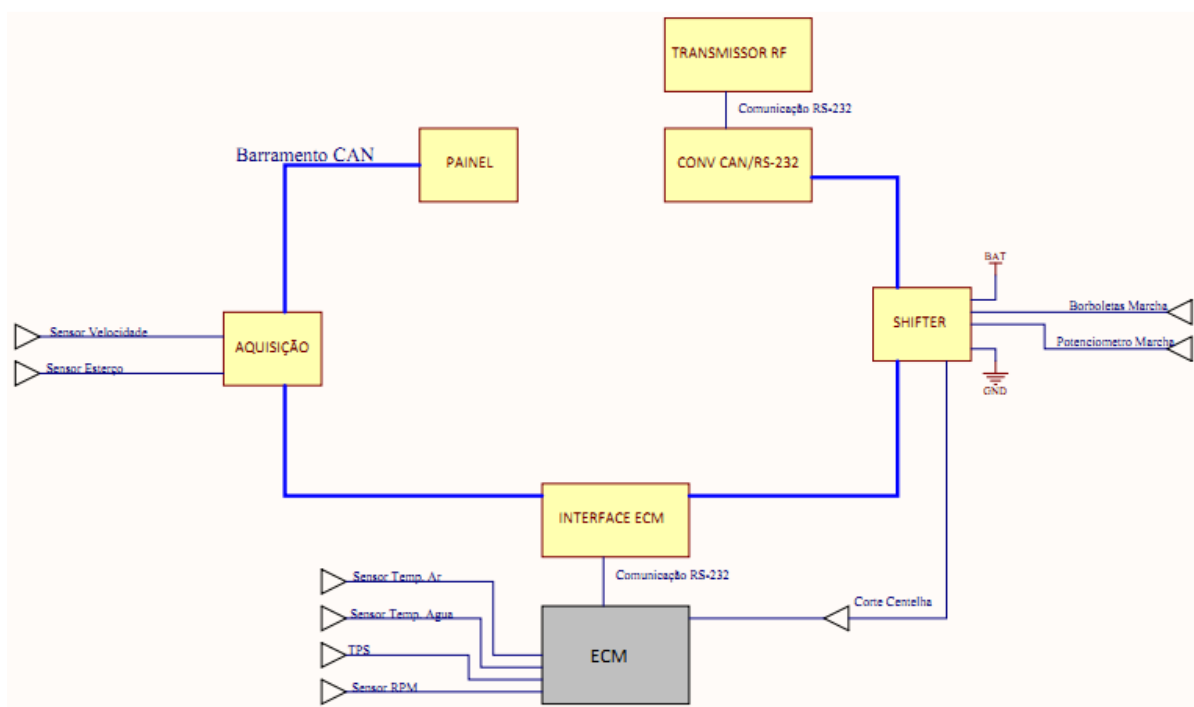


Figura 3 - Esquema elétrico do veículo de Formula SAE da equipe *Solid Edge EESC-USP* após da instalação de rede CAN.

2.2 Forças atuantes em um veículo

Para definir conceitos como aceleração lateral, aceleração longitudinal, movimentos de *Roll*, *Yaw* e *Pitch* deve-se estipular um eixo de coordenadas. Os eixos adotados serão os adotados pela convenção da SAE, como se pode ver na figura 4. Segundo Gillespie (1992), os movimentos do veículo são definidos com referência ao sistema ortogonal de coordenadas da mão direita, se originando no CG e atravessando o veículo. Os eixos são:

- X – Apontando para frente e no plano longitudinal de simetria.
- Y – Lateral saindo da direita do veículo.
- Z – Apontando para baixo do veículo.
- P – Velocidade de *roll* no eixo x.
- Q – Velocidade de *pitch* no eixo y.
- R – Velocidade de *yaw* no eixo z.

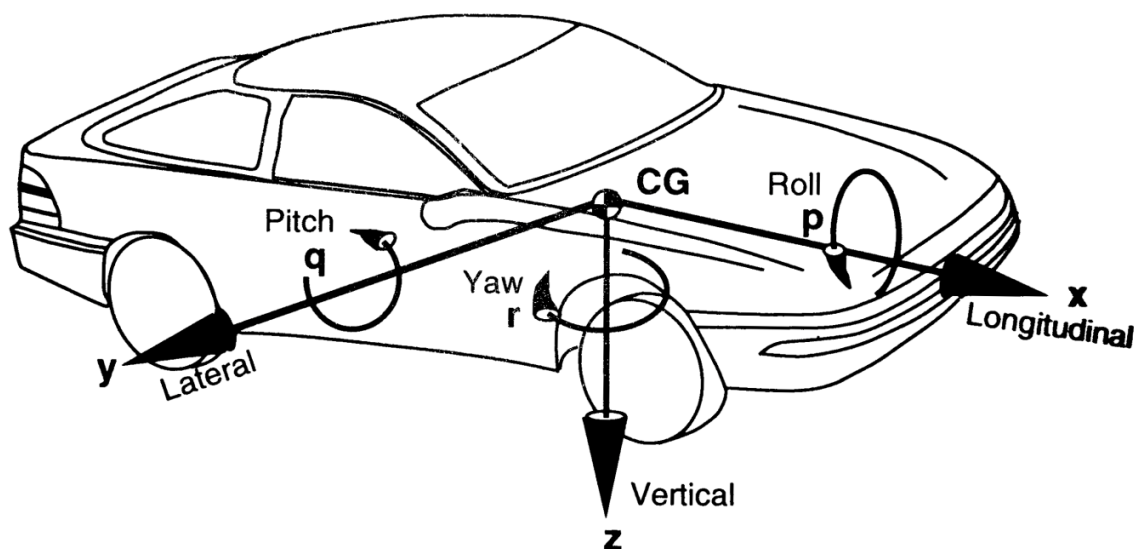


Figura 4 - Eixos de coordenadas de um veículo, adotados pela indústria automotiva (Gillespie, 1992).

A aceleração lateral é definida pela aceleração causada no eixo transversal do veículo, indicado na figura 4 pelo eixo y, ou lateral. Ela é gerada, por exemplo, quando o veículo realiza uma curva.

Já a aceleração longitudinal é aceleração causada no eixo longitudinal, e é gerada em acelerações e frenagens. E a aceleração vertical, causada no eixo vertical do veículo, é ocorre em buracos e ondulações na pista.

Os movimentos de *roll*, *yaw* e *pitch* são gerados por momentos nos eixos transversal, vertical e longitudinal, respectivamente.

O movimento de *roll* deriva do movimento de curva, fazendo com que o veículo gire em torno do eixo longitudinal. Aumentar a rolagem de um carro melhora sua aderência, mas compromete a velocidade com que muda de direção.

O movimento chamado de *pitch* é o giro em torno do eixo transversal, e faz com que o veículo “mergulhe” durante uma frenagem ou “empine” durante uma aceleração.

Por último, o movimento de *yaw* é o giro em torno do eixo vertical, indicando basicamente a mudança de direção do veículo quando este está realizando uma curva. O comportamento de todo carro em uma trajetória curvilínea deveria ser neutro, mas a maioria deles esterça mais ou menos do que o imposto pelo piloto.

O sub-esterço ou *understeer* ocorre quando um veículo esterça menos do que deveria em uma curva, apontando para fora da pista (como se pode ver na figura 5, à esquerda). De modo análogo, o sobre-esterço ou *oversteer* ocorre quando o carro esterça mais do que o solicitado pelo piloto, apontando para dentro da curva e tendendo a rodar.

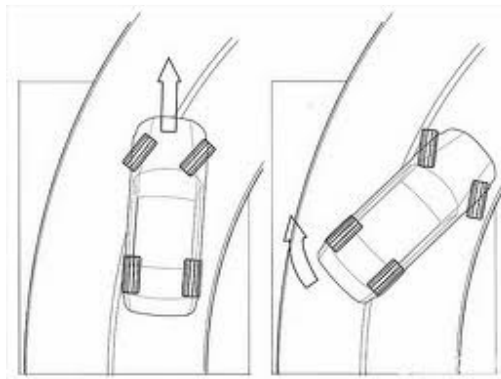


Figura 5 - Ilustração de um veículo com comportamento *understeer* (esquerda) e *oversteer* (direita).

Esses dois tipos de comportamento são facilmente identificáveis pelo piloto, mas combinando os dados de GPS e giroscópio é possível determinar exatamente quando ocorrem e qual a sua intensidade.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O sistema desenvolvido consiste de três partes: programação do microcontrolador, eletrônica, e interface do módulo com o computador. A interface do módulo com o computador engloba dois programas: um de interface com o *hardware* e outro de análise de dados. A figura 6 ilustra o diagrama de bloco do sistema.

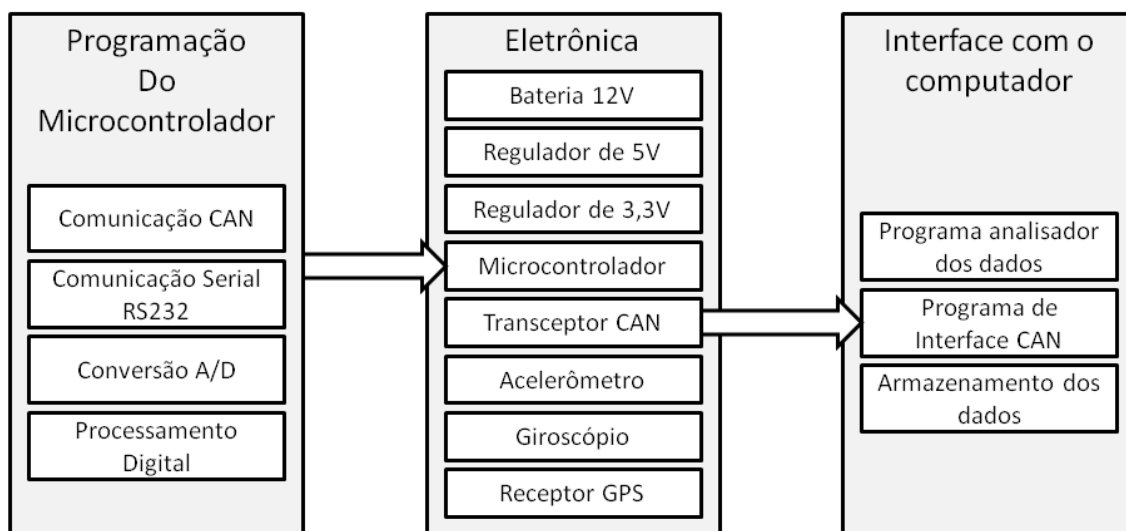


Figura 6 - Diagrama de blocos do sistema.

A parte de programação do microcontrolador inclui a biblioteca de comunicação CAN; as rotinas de comunicação serial, usadas para troca de informações com o receptor GPS; as rotinas de conversão analógico/digital, usadas na leitura do sinal do acelerômetro e do giroscópio; e do processamento digital dos sinais provindos do acelerômetro e do giroscópio.

A parte eletrônica consiste de uma bateria de 12 Volts externa ao módulo, que alimenta dois reguladores de tensão, de 5 e 3,3 Volts, responsáveis pela alimentação do módulo; um acelerômetro, que mede as acelerações a que é submetido; um giroscópio, que mede a velocidade angular do módulo; um receptor GPS, que indica a posição do módulo na terra e também a sua velocidade; um transceptor CAN, responsável por adequar os níveis de tensão do microcontrolador para o barramento CAN, e um microcontrolador, cuja tarefa é unir o sinal de todos os periféricos citados e formatá-las em pacotes que serão transmitidos através do protocolo CAN.

E a parte da interface com o computador, dividida em dois programas. O primeiro deles captura as mensagens enviadas ao barramento CAN e grava suas informações em

um arquivo de texto ao mesmo tempo em que as exibe em tempo real na tela do computador. O segundo programa abre o arquivo de texto gerado e permite uma melhor visualização e análise das informações obtidas.

Também foi usado neste sistema o módulo *Sniffer*, criado pela equipe de Formula SAE da EESC. Sua função é realizar a interface física entre módulo e computador, captando pacotes do barramento CAN e os enviando por comunicação serial RS232, ou recebendo pacotes por RS232 e os enviando ao barramento CAN. Ele é necessário uma vez que a maioria dos computadores não possui interface para esse protocolo. Mais detalhes sobre este componente serão abordados mais adiante.

Caso o computador utilizado não possua uma porta de comunicação RS232, é necessário um cabo conversor RS232 para USB. Neste sistema, foi utilizado o conversor da marca Belkin, classificado apenas como “*USB to Serial adapter*”.

A montagem final do sistema pode ser vista na figura 7. O microcontrolador realiza a leitura dos periféricos, e os envia ao barramento CAN. O módulo *sniffer* faz a conversão para a comunicação serial RS232. O cabo conversor realiza a conversão para USB, e então as informações são adquiridas pelo computador, para exibição na tela e armazenagem em arquivo.

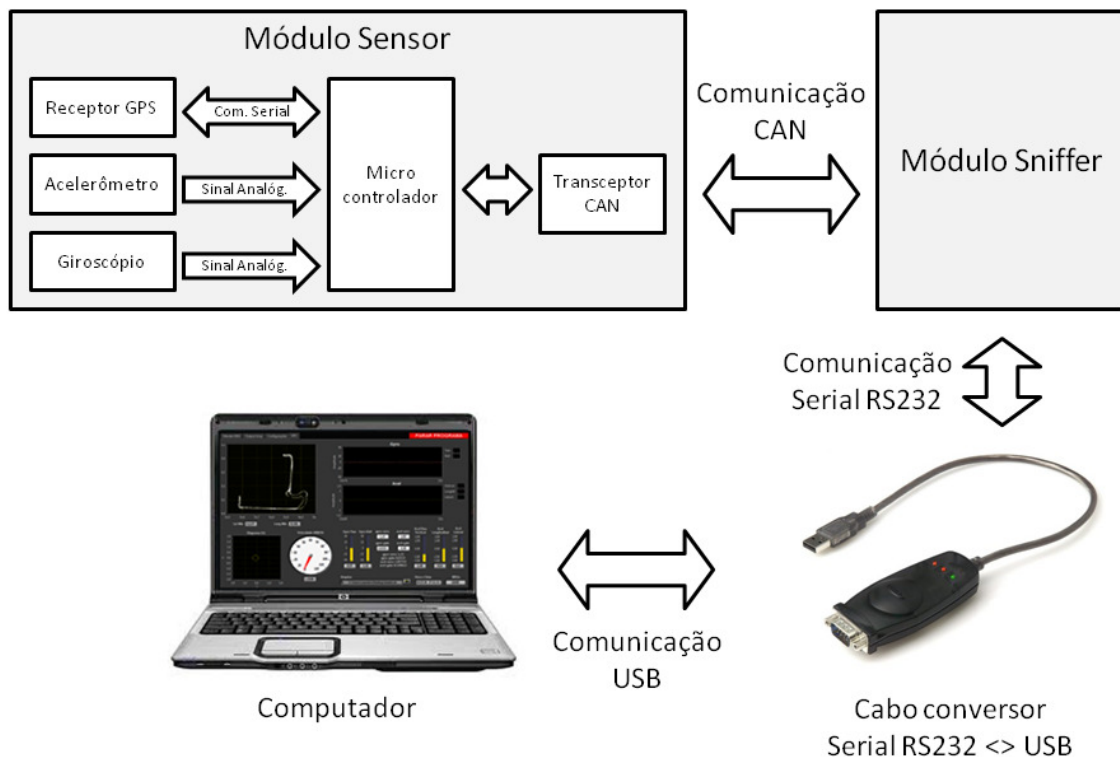


Figura 7 - Montagem de todo o sistema.

3.1 Eletrônica

Como visto anteriormente, a parte eletrônica consiste de uma bateria de 12 Volts externa, dois reguladores de tensão, um microcontrolador e periféricos como acelerômetro, giroscópio, receptor GPS e transceptor CAN. Há também filtros passa baixa para os sinais analógicos e LEDs indicadores de funcionamento. Tais itens serão descritos com mais detalhes a seguir.

3.1.1 Alimentação

Como fonte de energia foram utilizadas duas baterias da marca Unipower, com tensão de 6 Volts, e capacidade de 4,5 Ah (Ampère/hora). Um exemplar da bateria é exibido na figura 8. As duas baterias foram ligadas em série, fornecendo uma tensão de 12 Volts, suficiente para alimentar os dois reguladores de tensão, de 5 e 3,3 Volts.



Figura 8 - Bateria da marca Unipower. Tensão de 6 Volts e capacidade de 4,5Ah.

Utilizando o multímetro da marca Minipa, modelo ET-3388, constatou-se que o sistema consome uma corrente média de 210mA. Sabendo-se que a capacidade da bateria Cap_{BAT} é de 4,5Ah, e a corrente do sistema I_{SIST} é de 0,21A, é possível calcular a duração da bateria t_{BAT} :

$$t_{BAT} = \frac{Cap_{BAT}[Ah]}{I_{SIST}[A]} = \frac{4,5}{0,21} = 21,4 \text{ horas}$$

Assim, conclui-se que com essa fonte de alimentação o sistema funcionaria por mais de 21 horas de aquisições de dados.

3.1.2 Microcontrolador

Para a leitura dos sinais analógicos providos do acelerômetro e do giroscópio, das informações recebidas do GPS via comunicação serial RS232, formatação das informações em pacotes e envio no barramento CAN foi necessário o uso de um microcontrolador.

Foi escolhido um microcontrolador microchip PIC18F2680. Este componente foi escolhido por conter todas as funções de *hardware* necessárias para o projeto, como conversor analógico/digital, comunicação serial RS232, comunicação CAN, e ser encapsulado no formato PDIP, o que facilita sua montagem em matrizes de contatos e soldagem nas placas de circuito impresso. O componente é exibido na figura 9.



Figura 9 - Microcontrolador Microchip PIC18F2680, encapsulado no formato PDIP com 28 pinos.

Outro fator que contribuiu para sua escolha foi sua facilidade de programação. A Microchip fornece gratuitamente a plataforma de programação MPLAB IDE, o compilador C18 e bibliotecas com comando CAN, comunicação serial e conversão analógico digital.

Este microcontrolador possui 28 pinos, sendo 22 disponíveis como pinos de entrada e saída. Possui até 8 canais conversores analógico/digital de 10bits, comunicação serial RS232 e módulo CAN integrado. O circuito oscilador é formado por um cristal de 10 MHz e dois capacitores. Essa frequência é ainda multiplicada por quatro dentro do componente através do circuito de PLL (*Phase Locked Loop*), elevando o *clock* do microcontrolador para 40 MHz.

As funções do microcontrolador são:

- Leitura dos sinais analógicos e conversão dos mesmos para valores digitais;
- Filtrar ruído das leituras analógicas, calculando a média entre várias amostras;
- Via comunicação serial, receber pacotes de informação do receptor GPS e extrair as informações úteis destes pacotes;
- Formatar todos os dados em mensagens CAN, e enviá-las ao barramento.

3.1.3 Conversor A/D

A conversão dos sinais analógicos para sinais digitais é necessária para realizar operações e enviar os valores por meios de comunicação digital.

Neste projeto é usado um acelerômetro e um giroscópio, e ambos fornecem o sinal de saída no formato analógico. Este formato de sinal é mais simples de ser utilizado e calibrado, em comparação com sinais digitais como o SPI (*Serial Peripheral Interface*) ou I2C (*Inter Integrated Circuit*).

Para medir a tensão dos sinais analógicos, utilizou-se o conversor analógico/digital interno do PIC18F2680, que possui uma resolução de 10 bits. Ou seja, o conversor representa a tensão de entrada em uma palavra digital que assume valores de 0 a 1023: 0 quando o sinal é de 0 Volts, e 1023 quando o sinal está em 5 Volts, permitindo que o sinal analógico seja representado por 1024 níveis diferentes.

A resolução do sinal pode ser dada por:

$$Res = \frac{5V}{2^{10} - 1} = 4,89mV/bit$$

Logo, o bit menos significativo representa aproximadamente 4,9mV de variação no sinal de tensão medido. O erro da conversão é de no máximo meio bit menos significativo, e é dado por:

$$ER_{AD} = \frac{BMS}{2} = \frac{4,89}{2} = 2,445mV$$

A influência da resolução e do erro na conversão do sinal será abordada na seção de resultados.

3.1.4 Filtro passa-baixa

Para atenuar os ruídos causados por interferência elétrica e eletromagnética, que poderiam interferir na leitura do sinal analógico, foi utilizado um filtro passa-baixa para cada canal analógico.

Um filtro passa-baixa é um circuito elétrico que não provoca alterações em sinais de baixa frequência, mas atenua os sinais cuja frequência é maior que a frequência de corte calculada. Um exemplo deste circuito é exibido na figura 10, sendo formado por um resistor em série com o sinal, e um capacitor em paralelo ao sinal ligado ao terra.

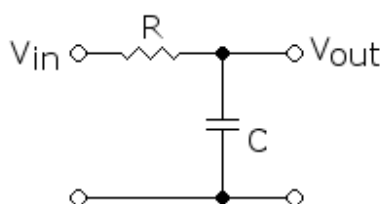


Figura 10 - Circuito elétrico usado como filtro passa-baixa.

A combinação de diferentes valores de resistência e capacitância resulta em diferentes frequências de corte. Sendo R a resistência do resistor da figura X, e C a capacitância do capacitor da mesma figura, a frequência de corte em Hertz é dada pela fórmula a seguir:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

Estudando o *datasheet* do giroscópio, descobriu-se que a máxima variação do seu sinal é de 140 Hz. Ou seja, as frequências de sinal muito maiores que 140 Hz não serão criadas pelo componente, mas sim por ruídos e interferências externas. Logo, foi estipulada uma frequência de corte de 150 Hz.

Para se construir um filtro passa-baixa com esta frequência de corte foi escolhido um resistor de $1K\Omega$, e um capacitor de $1\mu F$. A frequência de corte calculada a partir desses componentes foi de 159 Hz.

Os cálculos são exibidos abaixo:

$$R = 10^3\Omega, \quad C = 10^{-6}F, \quad f_c = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi 10^3 10^{-6}} = 159Hz$$

Maiores estudos sobre o filtro passa-baixa e o resultado no sinal analógico serão abordados na seção resultados.

3.1.5 Acelerômetro

Um acelerômetro é um dispositivo capaz de medir as acelerações impostas a si mesmo. Eles podem ter 1, 2 ou 3 eixos, possuem várias faixas de medição, e podem ser do tipo eletro-mecânico, piezoelétrico, resistivo, capacitivo ou sísmico.

Dispositivos do tipo capacitivo possuem uma massa interna que se move ao sofrer acelerações, mudando a capacitância entre si e as paredes ao redor. Esse sinal de capacitância passa por um condicionador de sinal, que o transforma em um sinal analógico proporcional à aceleração sofrida.

Neste projeto foi utilizado um acelerômetro do tipo capacitivo com 3 eixos, capaz de medir as acelerações lateral, longitudinal e vertical de um veículo. Acelerômetros também podem ser usados para medir vibrações nos componentes de um automóvel, e segundo Nwagboso (1993), as acelerações representam uma das grandezas físicas mais úteis para estratégias de controle de veículos.

O componente escolhido foi o acelerômetro MMA7341L, da Freescale, ilustrado pela figura 11. Segundo seu *datasheet*, este dispositivo possui a função de *self-test*, compensação por temperatura e precisão selecionável, capaz de medir acelerações na faixa de $\pm 3g$ ou $\pm 11g$. Seu sinal de saída é analógico e sua taxa máxima de atualização do sinal de saída é de 300Hz.

A escolha do componente foi baseada:

- No número de eixos, uma vez que o componente é capaz de medir acelerações nos eixos X, Y e Z;
- Na faixa de medida de $\pm 3g$, grande o suficiente para medir acelerações até em veículos superesportivos, que não ultrapassam 2g em qualquer eixo;
- Na facilidade de uso, por fornecer saídas analógicas de 0 a 3 Volts proporcionais a aceleração a que ele é submetido.

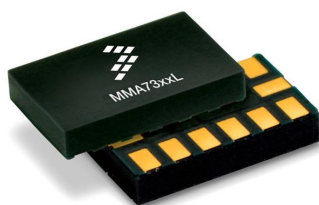


Figura 11 - Acelerômetro Freescale MMA7341L.

3.1.6 Giroscópio

Um giroscópio é um dispositivo capaz medir a velocidade angular imposta a si mesmo, em 1, 2 ou 3 eixos.

Neste projeto foi utilizado um giroscópio de 2 eixos, com o propósito de medir a velocidade e a variação angular de *yaw* e *roll*, explicadas anteriormente. Estas medidas ajudam a quantificar e analisar a dinâmica do veículo, em conjunto com o acelerômetro. Segundo Nwagboso (1993), nos veículos 4WS (*Four Wheel Steering*), no qual as quatro rodas esterçam, também há grande interesse em se medir as velocidades de *yaw* e *roll*.

Foi então escolhido o circuito integrado LPY503AL, da ST Microelectronics. Um giroscópio que, segundo seu *datasheet*, é capaz de medir velocidades angulares de $\pm 30^\circ/\text{segundo}$ ou $\pm 120^\circ/\text{segundo}$, com a função de *self-test*, alta resistência a choque e vibração, grande estabilidade à variação de temperatura, com uma atualização máxima de 140 Hz. Na figura 12 pode-se ver uma foto ilustrativa do componente.

A escolha do componente foi baseada:

- No número de eixos, X e Z;
- Na faixa de medição adequada para uso em automóveis, uma vez que veículos dificilmente atingem velocidade de *yaw* e *roll* de $120^\circ/\text{segundo}$, o que significaria dar uma volta em torno de si mesmo em 3 segundos;
- Na facilidade de uso, por fornecer saídas analógicas de 0 a 3 Volts linearmente proporcionais à sua velocidade angular.

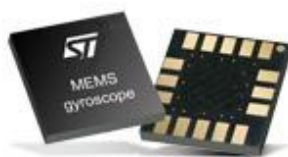


Figura 12 - Giroscópio LPY503AL, da ST Microelectronics.

3.1.7 GPS

Com o propósito de medir a velocidade de translado do módulo e a sua posição na superfície da terra foi utilizado um receptor GPS da Locosys, modelo LS20031. Assim, é possível medir a velocidade do veículo no qual o módulo está embarcado, além da sua trajetória na pista ou onde estiver transitando.

Este componente possui comunicação RS232 em nível TTL de tensão com *baudrate* configurável, taxa de atualização máxima de 5 Hz, é capaz de enviar até 6 tipos de mensagens diferentes, como GLL, GSV, RMC e VTG, cada uma contendo um conjunto de informações diferentes. Por exemplo, a mensagem GLL contém somente dados sobre o posicionamento geográfico, a VTG somente sobre a velocidade e a GSV informa os satélites usados. É possível configurar quais tipos de mensagens serão enviados e qual a taxa de retransmissão destas mensagens.

Uma foto ilustrativa do receptor é exibida na figura 13.

A escolha do componente foi baseada:

- Taxa de atualização de 5 Hz, maior que a média de 1 Hz;
- Na facilidade de comunicação com o microcontrolador.

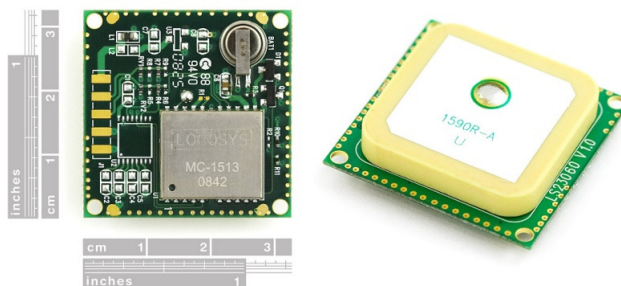


Figura 13 - Receptor GPS da Locosys, frente e verso.

O receptor foi configurado com um *baudrate* de 9600 bps, configurado para enviar apenas mensagens do tipo RMC e retransmiti-las a cada 200 milisegundos. A mensagem do tipo RMC foi escolhida por conter as duas informações de GPS necessárias para o projeto: posicionamento geográfico e velocidade, evitando assim o uso de outro tipo de mensagem e facilitando a programação do microcontrolador.

Essas mensagens são transmitidas por comunicação serial, onde um byte é transmitido por vez, formando um *frame* que contém as informações dispostas em uma

determinada ordem e separa por vírgulas. Um exemplo de um *frame* de mensagem do tipo RMC é mostrado na figura 14.

Este tipo de mensagem foi escolhido por transmitir, de uma só vez, todas as informações necessárias para este projeto: latitude e longitude, velocidade, data e hora.

A latitude e longitude estão no formato “Graus - Minutos Decimais”, onde os primeiro dígitos representam os graus das coordenadas, os próximos os minutos (cada grau é dividido em 60 minutos), e em seguida os minutos divididos decimalmente.

A velocidade está representada em nós. Um nó representa uma velocidade de 1 milha náutica por hora, e cada milha náutica é definida por 1852 metros. Portando, cada nó equivale a uma velocidade de 1,852km/h.

● RMC---Recommended Minimum Specific GNSS Data

Table 5.1-9 contains the values for the following example:

SGPRMC,053740.000,A,2503.6319,N,12136.0099,E,2.69,79.65,100106,,,A*53

Table 5.1-9 RMC Data Format

Name	Example	Units	Description
Message ID	SGPRMC		RMC protocol header
UTC Time	053740.000		hhmmss.sss
Status	A		A=data valid or V=data not valid
Latitude	2503.6319		ddmm.mmmm
N/S Indicator	N		N=north or S=south
Longitude	12136.0099		dddmm.mmmm
E/W Indicator	E		E=east or W=west
Speed over ground	2.69	knots	True
Course over ground	79.65	degrees	
Date	100106		ddmmyy
Magnetic variation		degrees	
Variation sense			E=east or W=west (Not shown)
Mode	A		A=autonomous, D=DGPS, E=DR
Checksum	*53		
<CR> <LF>			End of message termination

Figura 14 - Descrição do *frame* de mensagem RMC.

3.1.8 Montagem do *hardware* em matriz de contatos

Uma primeira versão do *hardware* foi montada em uma matriz de contatos. A montagem ocorreu por partes, começando pelos reguladores de tensão e dando sequência com o microcontrolador e alguns LEDs conectados a ele, para indicar seu funcionamento. Uma vez que este funcionou corretamente, montou-se o transceptor CAN e testou-se a comunicação CAN, conectando a matriz de contatos ao módulo *Sniffer* e visualizando as mensagens enviadas pelo módulo no computador.

O acelerômetro, o giroscópio e o receptor GPS só foram montados após a comunicação CAN estar funcionando. Essa forma de montagem do protótipo permite que pequenos erros de montagem sejam percebidos e corrigidos rapidamente.

Também foi montado, na matriz de contatos, um circuito que permite a gravação do microcontrolador *in circuit*, tornando o processo de gravação mais ágil e evitando o desgaste de componentes ao retirar e recolocar o microcontrolador da matriz de contatos.

Toda a montagem pode ser vista na figura 15. É possível ver o protótipo montado na matriz de contatos, o módulo *Sniffer* à esquerda, e o gravador PICKit 3 ligado à matriz de contatos para gravação *in circuit*.

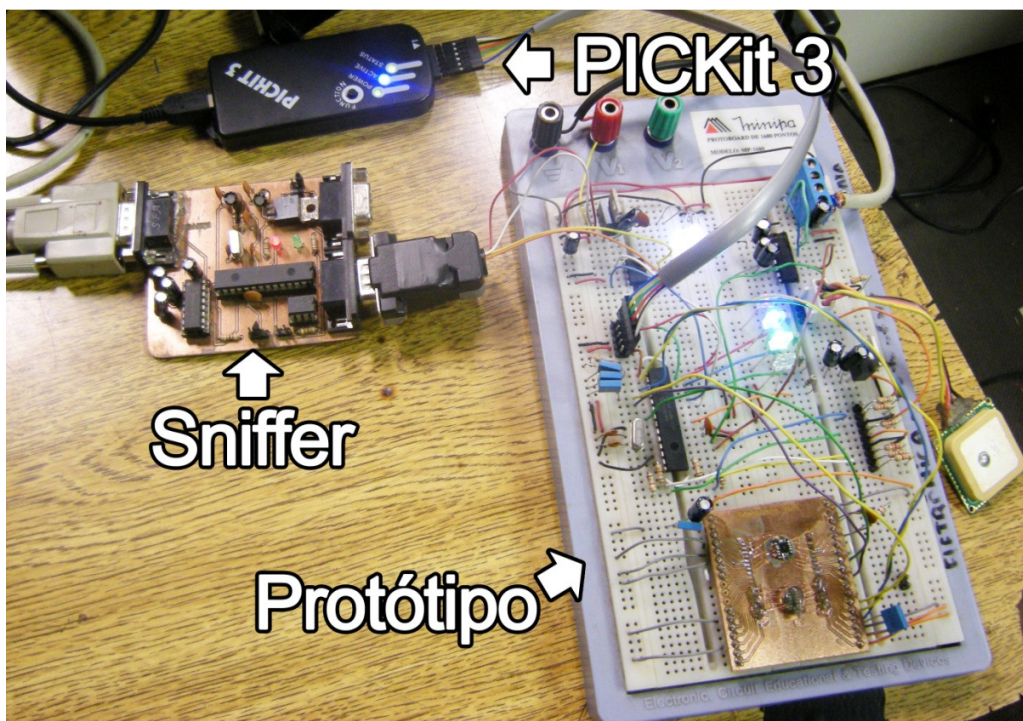


Figura 15 - Montagem do *hardware* inicial na matriz de contatos, gravador PICKit3 (acima) e módulo conversor *Sniffer* (à esquerda).

3.1.9 Montagem do *hardware* em placa de circuito impresso universal

Após o *hardware* ser montado em matriz de contato, e todas suas funcionalidades serem testadas, ele foi considerado como definitivo e então o próximo passo deu-se por montá-lo em uma placa de circuito impresso universal.

Nessa montagem os componentes são soldados, diminuindo as possibilidades de mau contato e permitindo testar o módulo em um veículo.

Na figura 16 pode-se ver o resultado da montagem do módulo na placa de circuito impresso universal.

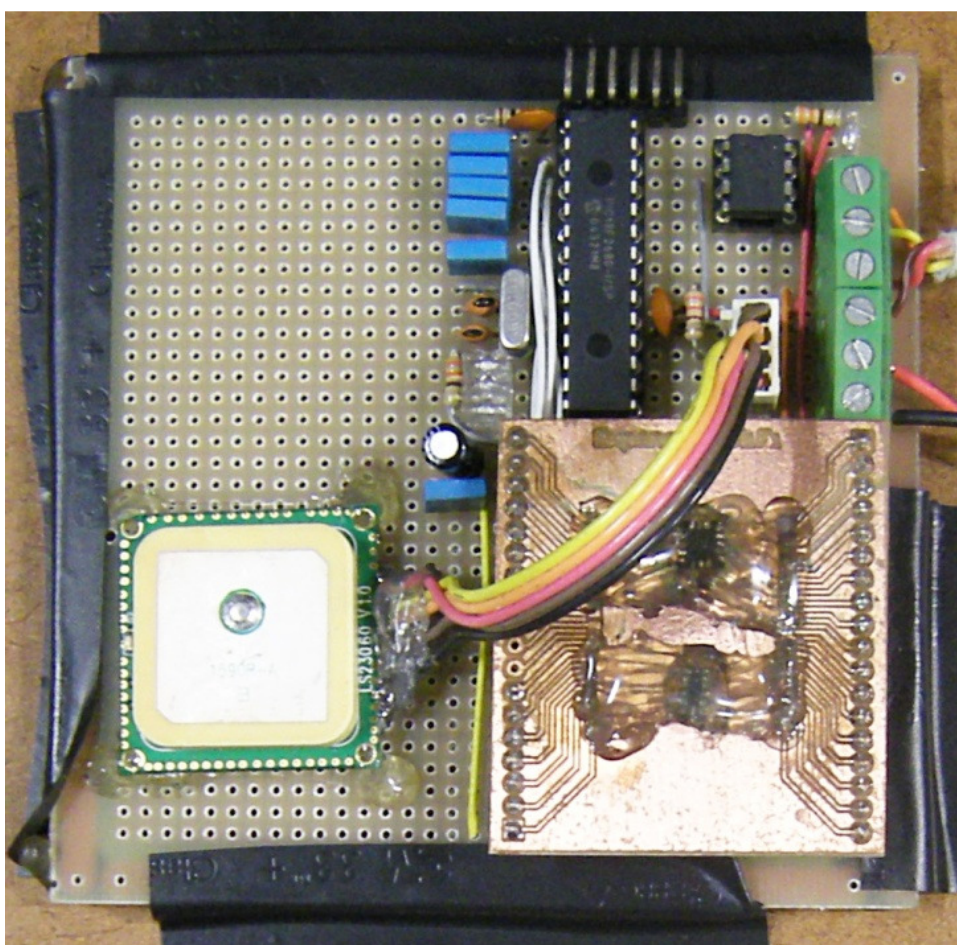


Figura 16 - *Hardware* montado em placa de circuito impresso universal.

O *hardware* definitivo é alimentado por uma bateria externa de 12 Volts, já citada anteriormente. Para regular a tensão para os componentes eletrônicos foram utilizados dois reguladores, um de 5 e um de 3,3 Volts. O microcontrolador, o transceptor CAN

utilizam a tensão de alimentação de 5 Volts, enquanto que o acelerômetro, o giroscópio e o receptor GPS são alimentados por 3,3 Volts. Em ambos os reguladores, seguiu-se a montagem de capacitores aconselhada no *datasheet*, utilizada para atenuar ruídos de entrada e amenizar os ruídos criados pelo próprio componente.

Quatro conectores externos foram montados. Eles são utilizados para o barramento CAN, comunicação com o receptor GPS, gravação ICSP (*In-Circuit Serial Programming*) e alimentação do módulo.

O transceptor CAN é responsável por adequar os níveis de tensão do barramento CAN a níveis TTL, que podem ser interpretados pelo microcontrolador PIC.

A ligação do giroscópio exigiu alguns capacitores e resistores, aconselhados no *datasheet*. Todas suas configurações foram acertadas para uso normal, e foram utilizadas as saídas padrão ao invés das saídas amplificadas em 4x, pois permitem uma maior faixa de medição da velocidade angular.

A montagem do acelerômetro também ocorreu seguindo-se o *datasheet* do componente, mas é mais simples, necessitando de menos componentes. Ele foi configurado para uso normal, com faixa de medição de $\pm 3G$ ao invés do *range* de $\pm 11G$, sendo mais adequada para uso em veículos e proporcionando maior precisão para a conversão analógico/digital.

Todos os sinais analógicos passam por um filtro passa-baixa composto por um resistor de $1K\Omega$ em série com o sinal e um capacitor de $1\mu F$ em paralelo com o mesmo. O filtro tem o propósito de filtrar ruídos externos que podem causar interferência no sinal, como, por exemplo, o campo magnético gerado pelo motor do veículo, seus bicos injetores e bobinas de ignição.

O módulo receptor GPS foi alimentado com 3,3 Volts e conectado ao microcontrolador por comunicação serial. Utilizou-se um resistor de *pull-up* de 330Ω na linha de transmissão do receptor, para adequar o nível de tensão entre ele e o microcontrolador. Este valor de resistência foi baseado em um experimento visto no site Saber Eletrônica.

Para o microcontrolador também se utilizou a montagem aconselhada no *datasheet*, com capacitores perto da alimentação, circuito de *reset* no pino 1 e uso de capacitores junto ao cristal formando um circuito oscilador.

Três LEDs, um azul, um amarelo e um verde foram conectados ao microcontrolador, para indicar o funcionamento do código e facilitar o diagnóstico de possíveis falhas.

3.2 Programação do Microcontrolador

3.2.1 Plataforma de Programação e Gravação

A plataforma de programação utilizada foi a IDE MPLAB versão 8.63. O código foi escrito em linguagem C, e compilado através do compilador C18. O MPLAB e o compilador C18 são fornecidos pela Microchip, e portanto são altamente compatíveis com várias bibliotecas e gravadores, facilitando a programação e diminuindo o tempo de desenvolvimento.

O gravador usado foi o PICKit 3, projeto desenvolvido pela Microchip. Ele possui um soquete para inserção do microcontrolador, mas também possui um cabo que permite a ligação direta ao componente e a gravação na placa (gravação *in circuit*).

Neste projeto fez-se o uso da gravação diretamente na placa, por diminuir o desgaste dos componentes e economizar tempo de retirada do microcontrolador da placa e inserção no gravador.

3.2.2 Processamento digital do sinal

Mesmo utilizando-se o filtro passa-baixa, decidiu-se por criar um filtro de média em *software*. Esse filtro funciona amostrando valores da porta analógica em um período 10 vezes menor do que o período de envio da mensagem. Os valores das amostras são somados, e divididos por 10 logo antes do envio da mensagem. Ou seja, o valor enviado na mensagem será a média de 10 amostras realizadas.

Além de ser um filtro de ruído, essa técnica também melhora a fidelidade da amostragem ao sinal real, uma vez que se está aumentando a taxa de amostragem.

3.2.3 Organização das mensagens CAN

Todas as informações coletadas a partir do acelerômetro, giroscópio e do receptor GPS precisam ser enviadas ao barramento CAN, que permitirá a leitura das informações pelo computador e por outros módulos que possam estar conectados ao barramento.

Cada mensagem possui seu próprio valor identificador, dado pelo campo ID, que identifica seu conteúdo. Mensagens com IDs diferentes possuem informações diferentes.

Cada mensagem enviada ao barramento CAN é capaz de conter, além das informações de protocolo, de 0 a 8 *Bytes* de dados.

No caso de dados maiores que um *Byte*, como por exemplo os resultados das conversões analógicas de 10 *bits*, eles são divididos em *High Byte* e *Low Byte*. Um *Byte* contém os *bits* mais significativos e o outro os menos significativos.

A organização das mensagens pode ser observada na tabela 1. O módulo envia cinco tipos de mensagens diferentes:

- Posição pelo GPS: Valores de latitude e longitude;
- Data pelo GPS: Hora, Minuto, Segundo, Dia, Mês e Ano;
- Velocidade pelo GPS;
- Dados do Acelerômetro: Valor da aceleração nos eixos vertical, longitudinal e lateral;
- Dados do Giroscópio: Velocidade angular nos eixos de *yaw* e *roll*.

Tabela 1 - Mensagens que são trocadas com o módulo através do barramento CAN.

Mensagem	Taxa de transmissão padrão	ID da Mensagem	Dado[0]	Dado[1]	Dado[2]	Dado[3]	Dado[4]	Dado[5]	Dado[6]	Dado[7]
Posição GPS	5Hz	120	Latitude, Graus, High bits	Latitude, Graus, Low bits	Latitude, Minutos, High bits	Latitude, Minutos, Low bits	Longitude, Graus, High bits	Longitude, Graus, Low bits	Longitude, Minutos, High bits	Longitude, Minutos, Low bits
Velocidade GPS	5Hz	121	Velocidade GPS, High bits	Velocidade GPS, Low bits	-	-	-	-	-	-
Data GPS	1Hz	122	Hora	Minuto	Segundo	Dia	Mês	Ano	-	-
Dados Acelerômetro	10Hz	123	Aceleração Vertical, High bits	Aceleração Vertical, Low bits	Aceleração Longitudinal, High bits	Aceleração Longitudinal, Low bits	Aceleração Lateral, High bits	Aceleração Lateral, Low bits	-	-
Dados Giroscópio	10Hz	124	Velocidade Angular de Yaw, High bits	Velocidade Angular de Yaw, Low bits	Velocidade Angular de Rolagem, High bits	Velocidade Angular de Rolagem, Low bits	-	-	-	-
ConfiguraTaxa de Envio Posicao GPS	Sob Demanda	125	Período de envio (ms), High bits	Período de envio (ms), Low bits	-	-	-	-	-	-
ConfiguraTaxa de Envio Velocidade GPS	Sob Demanda	126	Período de envio (ms), High bits	Período de envio (ms), Low bits	-	-	-	-	-	-
ConfiguraTaxa de Envio Data GPS	Sob Demanda	127	Período de envio (ms), High bits	Período de envio (ms), Low bits	-	-	-	-	-	-
ConfiguraTaxa de Envio Dados Acel.	Sob Demanda	128	Período de envio (ms), High bits	Período de envio (ms), Low bits	-	-	-	-	-	-
ConfiguraTaxa de Envio Dados Girosc.	Sob Demanda	129	Período de envio (ms), High bits	Período de envio (ms), Low bits	-	-	-	-	-	-

3.2.4 Programação

Como citado anteriormente, o programa do microcontrolador tem como função receber as informações de periféricos como o acelerômetro, o giroscópio e o receptor GPS, formatá-las em mensagens e enviá-las ao barramento CAN.

A programação do microcontrolador foi baseada na modularidade. Como se pode ver no fluxograma da figura 17, o código é formado por pequenos trechos de código que são ativados por *flags*. Cada trecho de código possui sua própria variável contadora de tempo e uma variável que indica o período com que deve ocorrer. Uma *flag* é “levantada” quando a variável contadora ultrapassa o valor do período desejado, e então o código é executado.

A contagem do tempo é realizada por interrupções de *timer* que ocorrem a cada 1 milissegundo. A cada interrupção, as variáveis contadoras são incrementadas.

Dessa forma é possível controlar o período da execução de cada funcionalidade independentemente. Por exemplo, o envio dos sinais do acelerômetro pode ocorrer a cada 100 milissegundos, enquanto que o envio da mensagem que informa ocorra apenas a cada 1 segundo.

A recepção dos *Bytes* enviados pelo receptor GPS é feita por interrupção, que por ser mais rápida que a verificação no código principal evita a perda de informações.

Sempre que há um *Byte* na porta de entrada, é gerada uma interrupção que armazena o dado recebido em um vetor. Ao final da mensagem é levantada uma *flag*, que faz com que o código principal examine a mensagem enviada pelo receptor GPS e extraia as informações úteis ao sistema.

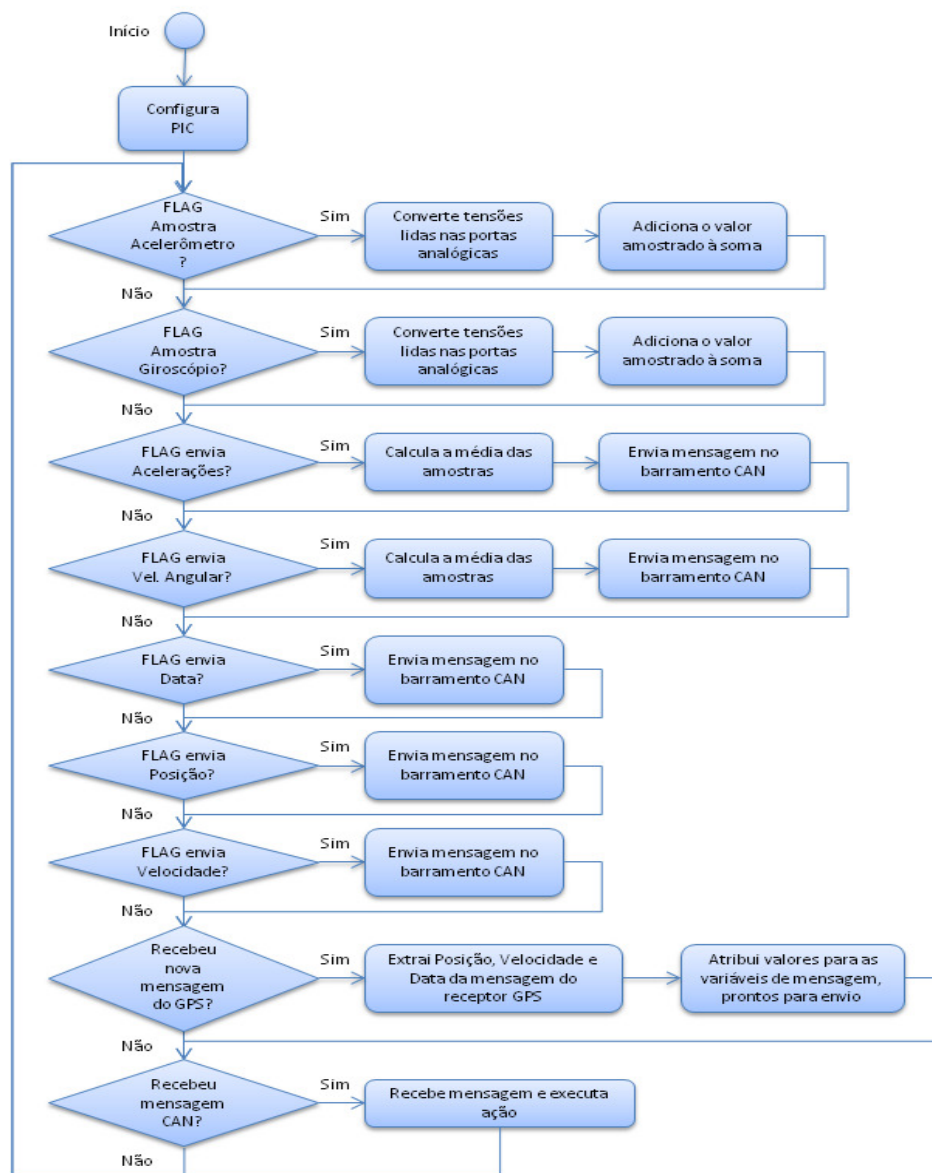


Figura 17 - Fluxograma do código principal do microcontrolador.

3.3 Interface com o computador

3.3.1 Sniffer

Como a interface de comunicação do módulo eletrônico desenvolvido neste projeto é CAN, e a maioria dos computadores não tem esse tipo de interface, foi utilizado um módulo chamado *Sniffer*, que realiza a conversão de interface entre a comunicação CAN e a comunicação serial RS232.

Este conversor foi desenvolvido e construído pela própria equipe de Formula SAE. Constituído de um microcontrolador PIC18F258, uma interface CAN e uma interface RS232, ele tem a função de captar todas as mensagens no barramento CAN e enviá-las à comunicação serial RS232 em um frame de dados, assim como recebe frames de dados pela RS232 e as envia para o barramento CAN.

Seu funcionamento é exemplificado na figura 18.

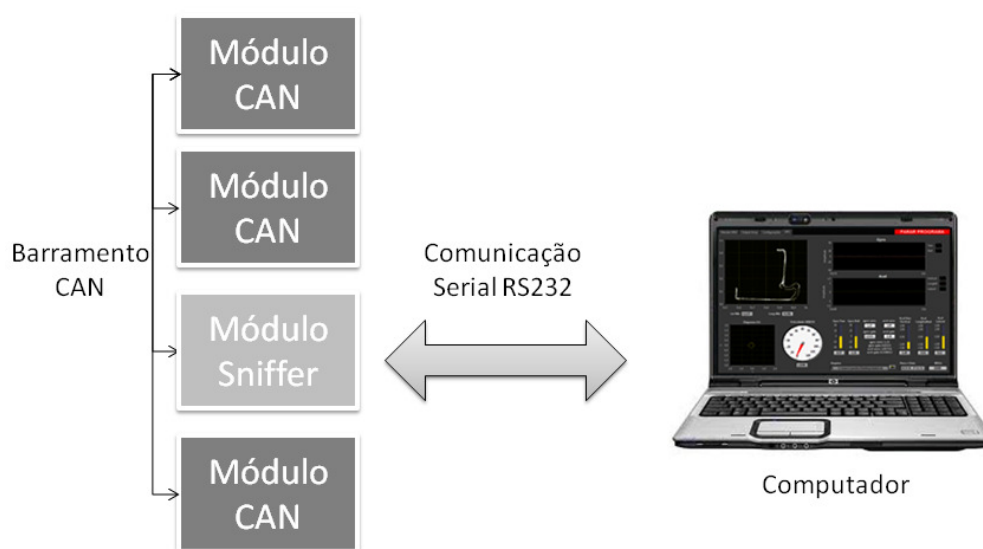


Figura 18 - Funcionamento do módulo *Sniffer*.

3.3.2 Software de interface com o computador

Uma vez que o microcontrolador recebeu as informações dos periféricos (acelerômetro, do giroscópio e receptor GPS), as enviou ao barramento CAN, e o módulo *Sniffer* as converteu para a comunicação serial RS232, elas podem ser recebidas e interpretadas por um computador.

Para realizar tal tarefa, foi criado um *software* em LabVIEW, responsável por ler a porta de comunicação serial, organizar os *Bytes* recebidos em mensagens, interpretar essas mensagens, e então exibir os dados na tela e também armazená-los em um arquivo de texto.

A plataforma de programação LabVIEW foi escolhida por proporcionar fácil interação com a porta de comunicação serial e também fácil programação da interface gráfica.

A tela principal do programa pode ser vista na figura 19.

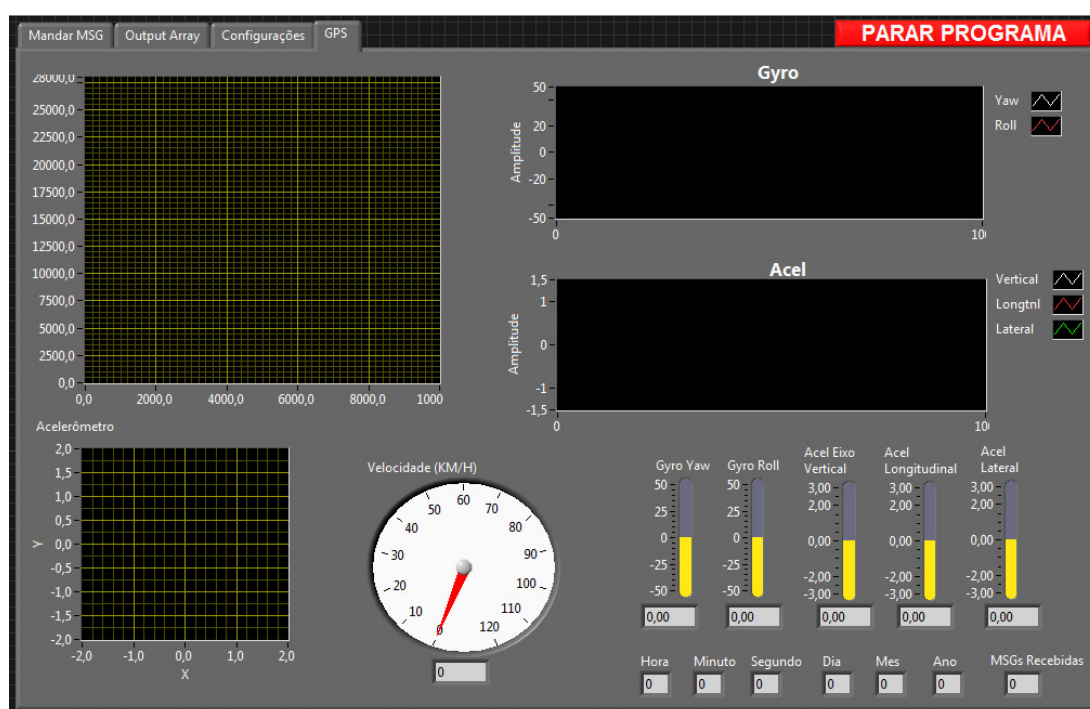


Figura 19 - Tela do programa de interface entre o barramento CAN e o computador.

O programa possui um gráfico XY que indica o traçado percorrido, e um gráfico XY que indica a grandeza da aceleração sofrida no módulo e a sua direção. Para exibir as acelerações e velocidades angulares, são utilizados mostradores em barra e gráfico de

histórico no tempo. Há também um mostrador analógico para indicação da velocidade e um mostrador de data e hora.

Este programa também permite a calibração independente de cada eixo de aceleração e de velocidade angular.

3.3.3 Formato do arquivo de dados gerado pelo programa

O programa em LabVIEW, além de exibir os dados na tela, gera um arquivo de texto para análise posterior, que contém todos os dados recebidos separados por tabulação.

Cada coluna representa uma informação diferente, e possui um cabeçalho de texto indicando qual informação ela representa. Cada linha representa uma amostra dos dados, gravados a cada 100 milissegundos.

Os dados gravados no arquivo são:

- Velocidade de *yaw* em graus/segundos;
- Velocidade de *roll* em graus/segundos;
- Aceleração no eixo vertical, em G;
- Aceleração no eixo longitudinal, em G;
- Aceleração no eixo lateral, em G;
- Latitude da posição do veículo (somente os minutos);
- Longitude da posição do veículo (somente os minutos);
- Velocidade do veículo, em Km/h;
- Ano, mês, dia, e hora, minuto e segundo.

3.3.4 Software para leitura e análise dos dados

Foi criado outro programa em LabVIEW, com o objetivo de abrir os arquivos de texto gerados e permitir a visualização e a análise dos dados armazenados. Um exemplo da tela do programa pode ser visto na figura 20.

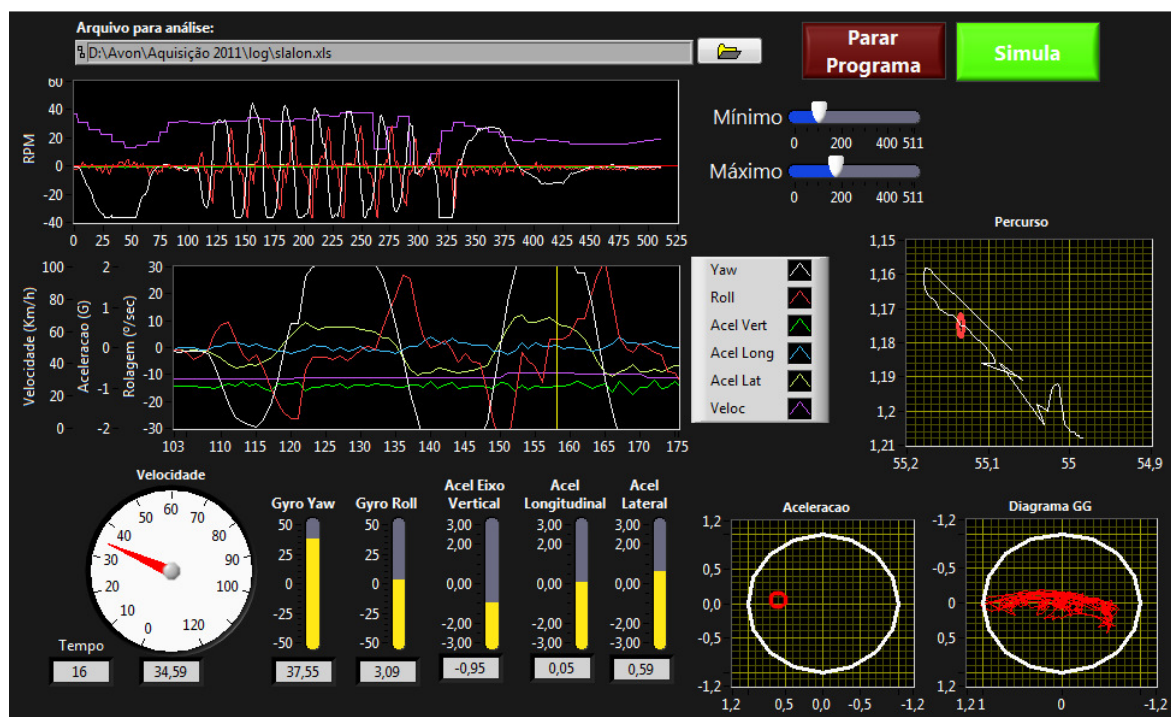


Figura 20 - Tela do *software* leitor de análise dos dados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram feitos alguns testes em bancada, em relação à conversão Analógico/Digital e ocasionais travamentos do módulo. Em seguida, calibraram-se os sinais de aceleração e velocidade angular.

Com o *hardware* apresentando uma leitura confiável dos componentes, e os programas de interface calibrados, iniciaram-se os testes em veículos de passeio.

Detalhes dos testes realizados e dos resultados obtidos são abordados a seguir.

4.1 Precisão da leitura A/D

O sinal analógico medido na entrada no microcontrolador foi medido com um multímetro da marca Minipa, modelo ET-3388. O valor de tensão em três pontos foi medido e comparado com o calculado pelo PIC e exibido no *software* de interface. Os resultados encontram-se na tabela 2.

Tabela 2 - Valores de tensão medidos pelo multímetro e pelo microcontrolador.

Multímetro (Volts)	LabVIEW (Volts)	Erro (%)
1,315	1,320	0,38
1,844	1,850	0,33
1,871	1,880	0,48

Pode-se perceber que o erro de leitura nesses três pontos não ultrapassou 0,5%, sendo muito próximo do erro já previsto para a conversão A/D e pouco significativo para este projeto.

4.2 Ruídos na leitura A/D

Para eliminar ruídos e interferências externas, foi utilizado um filtro de ruído composto por duas partes: o filtro passa-baixa feito com um circuito elétrico (formado por um resistor e um capacitor), e um filtro de média amostral implementado em *software*, já citado anteriormente no item 3.2.2.

Foi feito um estudo para determinar a influência dos filtros no sinal lido pelo microcontrolador. Foram criados três tipos de filtros diferentes, cada um foi testado com o mesmo sinal de entrada, e avaliou-se o ruído no sinal e a amplitude máxima deste ruído.

Como sinal de entrada utilizou-se um canal do acelerômetro. O acelerômetro foi mantido imóvel, gerando um sinal constante de 1,313 Volts. Para cada tipo de filtro foram

tomadas 350 amostras deste sinal. Como a tensão do sinal é constante, um meio de determinar o ruído gerado é somar as variações de tensão entre cada ponto e dividir pelo número total de amostras, calculando-se o ruído médio no sinal. Quanto mais ruído, maior a média de ruído. Para determinar a amplitude máxima, foi analisado o ponto em que a diferença de tensão entre duas amostras foi máxima.

As três combinações de filtros foram:

- Filtro formado somente com um capacitor de 3,3 nF. Sem média amostral por *software*;
- Filtro passa-baixa com resistor de 1K Ω , com um capacitor de 1 μ F. Sem média amostral por *software*;
- Filtro passa-baixa com resistor de 1K Ω , com um capacitor de 1 μ F. Com média amostral por *software*, utilizando 10 amostras.

Os resultados são exibidos na tabela 3.

Tabela 3 - Ruído gerado nos três tipos de filtros testados.

Tipo de Filtro	Ruído médio (mV)	Amplitude (mV)
Sem Resistor, Capacitor de 3,3 nF, Sem Média Amostral	3,64	19
Resistor de 1K Ω , Capacitor de 1 μ F, Sem Média Amostral	0,22	5
Resistor de 1K Ω , Capacitor de 1 μ F, Com Média Amostral	0	0

Pode-se observar que somente o filtro passa-baixa já contribui para grande parte da atenuação do ruído, mas em conjunto com a média amostral por *software* o nível de ruído foi levado a zero.

No projeto final, como citado anteriormente, optou-se pela utilização da melhor combinação analisada: filtro passa-baixa com resistor de 1K Ω e capacitor de 1 μ F, em conjunto com o filtro da média amostral por *software* utilizando 10 amostras.

4.3 Calibração

A calibração dos sinais do acelerômetro e do giroscópio foi feita através do programa de leitura de dados, feito em LabVIEW. Cada canal pode ser calibrado independentemente, seguindo a fórmula:

$$\text{Resultado da Conversão} = \frac{V_{AMOSTRA} - V_{ZERO}}{V_{GANHO}}$$

Onde $V_{AMOSTRA}$ é a tensão amostrada, V_{ZERO} é o valor de tensão quando o resultado da conversão é zero, e V_{GANHO} a relação entre a variação na tensão e o resultado da conversão.

Os valores de V_{ZERO} e V_{GANHO} dos canais do acelerômetro foram calibrados com base no campo gravitacional da terra. O valor da gravidade varia de acordo com a altitude e latitude, possuindo um valor padrão de $g=9,802\text{m/s}^2$ (Symon, 1982), mas assumindo valores de $g=9,78039\text{m/s}^2$ no equador e $g=9,83217\text{m/s}^2$ no pólo (Ramalho, 1979).

Essas variações de gravidade, no entanto, geram uma diferença menor que 0,5% no valor de g , sendo menores que o erro do conversor A/D. Assim o valor de g considerado foi de $g=9,8\text{m/s}^2$.

A calibração dos eixos do acelerômetro pode ser ilustrada pela figura 21. Como ferramenta para medição da inclinação, foi usado um iPhone com o aplicativo Carpenter. Esse aplicativo simula uma ferramenta de nível, baseando-se nas medidas de seu acelerômetro interno.

Cada um dos eixos do acelerômetro foi calibrado da seguinte maneira:

- Posiciona-se o eixo perpendicularmente à direção do campo gravitacional da terra, mantendo-o imóvel, fazendo com que nenhuma aceleração seja imposta a ele;
- Ajusta-se o valor de V_{ZERO} até que se obtenha o valor de 0 g como resultado da conversão;
- Posiciona-se o mesmo eixo paralelamente à direção do campo gravitacional da terra, mantendo-o imóvel, fazendo com que uma direção de 1 g seja imposta a ele;
- Ajusta-se o valor de V_{GANHO} até que se obtenha um valor de 1 g como resultado da conversão.

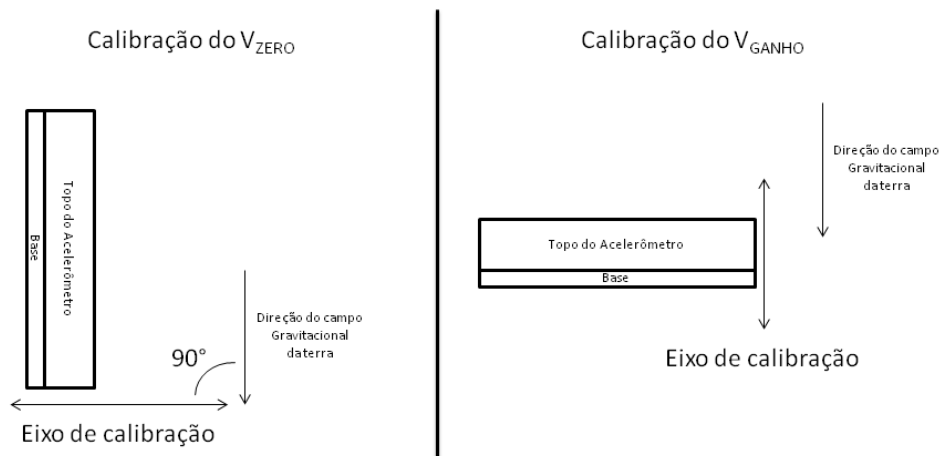


Figura 21 - Ilustração da calibração dos eixos do acelerômetro.

A calibração do giroscópio ocorreu de maneira análoga. O componente foi mantido imóvel, e foi calibrado o V_{ZERO} de seus canais. O valor V_{GANHO} foi retirado do *datasheet* do componente. Assumindo-se que o conversor Analógico/Digital tenha um erro de 0,5%, e tomando o valor de ganho do *datasheet* como correto, assume-se que a medida da velocidade angular tenha um erro de no máximo 0,5%.

4.4 Testes em um veículo de passeio

O sistema, constituído de um módulo sensor, um módulo *Sniffer* e as duas baterias de alimentação, foi montado em um automóvel para realização dos testes. O automóvel utilizado foi um Fiat Palio Fire 1.3, modelo 2004.

O módulo sensor foi nivelado usando o aplicativo de iPhone Carpenter, conseguindo-se inclinações da placa menores que $0,5^\circ$. Uma imagem do módulo fixado com o aplicativo indicando sua inclinação é exibida na figura 22.



Figura 22 - Módulo sensor fixado no painel do carro, nivelado a partir do aplicativo Carpenter para iPhone.

O módulo sensor e o módulo Sniffer foram então fixados ao painel, e ligados as baterias, localizadas aos pés do passageiro. Esta montagem é exibida na figura 23.



Figura 23 - Montagem do sistema em um veículo de passeio, com o propósito de testar seu funcionamento.

4.4.1 Teste de aceleração e frenagem

Neste teste, o veículo partiu do repouso, acelerou até uma velocidade de 76 km/h e então freou bruscamente até parar. Os resultados da aquisição, examinados no programa de leitura de dados feito em LabVIEW, são exibidos na figura 24 e na figura 25.

Os gráficos no canto superior esquerdo das figuras 24 e 25, neste caso, mostram a velocidade e a aceleração longitudinal do veículo. A velocidade é indicada pela linha roxa

marcada com um X em cara ponto, a aceleração longitudinal é indicada pela linha azul contínua.

O cursor amarelo indica o momento da análise, todas as informações sendo exibidas pelos mostradores dizem respeito a esse momento.

A figura 24 mostra o comportamento do veículo momentos depois da largada. O veículo ainda está viajando a uma velocidade baixa, de 14 km/h, e sua aceleração longitudinal é alta, de -0,2 g, pois está acelerando em primeira marcha. Pode-se notar que, como o carro está viajando em linha reta, a aceleração lateral, as velocidades de *yaw* e *roll* são praticamente zero.

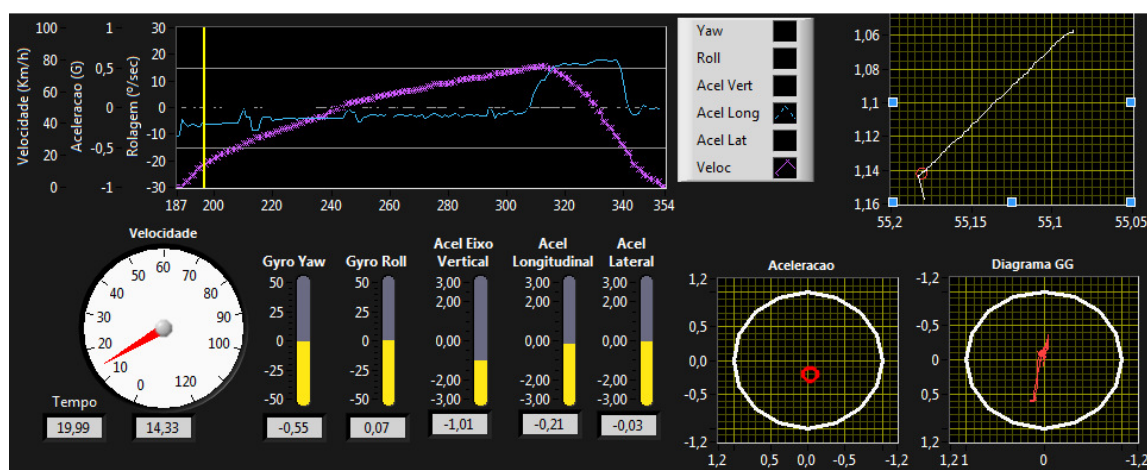


Figura 24 - Análise do teste de aceleração e frenagem. Momento logo após a saída.

Após atingir 76 km/h, o veículo começa a frenagem brusca. A figura 25 indica o momento de máxima frenagem. Pode-se notar que a aceleração longitudinal é de +0,6 g, representando uma desaceleração forte. Neste momento a aceleração lateral, as velocidades de *yaw* e de *roll* já indicam que o veículo está realizando uma leve curva, o que pode ser comprovado ao olhar o gráfico de percurso, no canto superior direito.

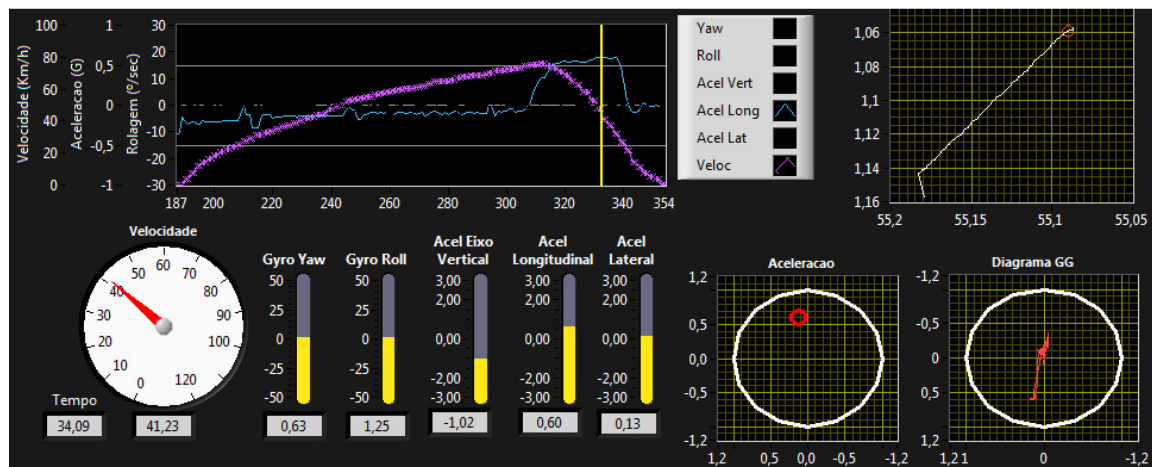


Figura 25 - Análise do teste de aceleração e frenagem. Momento de frenagem máxima.

A partir deste teste, pode-se constatar que a máxima aceleração do veículo é de 0,2 g, ou 1,96m/s², e sua máxima desaceleração é de 0,6 g, ou 5,88m/s².

4.4.2 Teste de *Skid Pad*

O teste de *skid pad* consiste em percorrer uma trajetória circular de raio constante, representando um regime permanente de curva. Quanto maior a velocidade do veículo neste teste, maior sua aceleração lateral e maior sua capacidade de realizar curvas.

A figura 26 ilustra um circuito de *skid pad*.



Figura 26 - Circuito de *skid pad*.

A figura 27 exibe a análise dos dados de um *skid pad*, obtidos a partir de um teste com um Fiat Palio na cidade de São Carlos, SP, em uma rotatória localizada na Rua Passeio dos Ipês. Pode-se observar que, por se tratar de um teste de regime permanente, quase todas as grandezas permanecem constantes.

O momento de máxima aceleração lateral é indicado pelo cursor do gráfico. Neste instante, o veículo alcançou uma aceleração lateral de 0,58 g, ou 5,69m/s². Segundo o site MotorTrend, automóveis esportivos alcançam acelerações laterais próximas a 1 g,

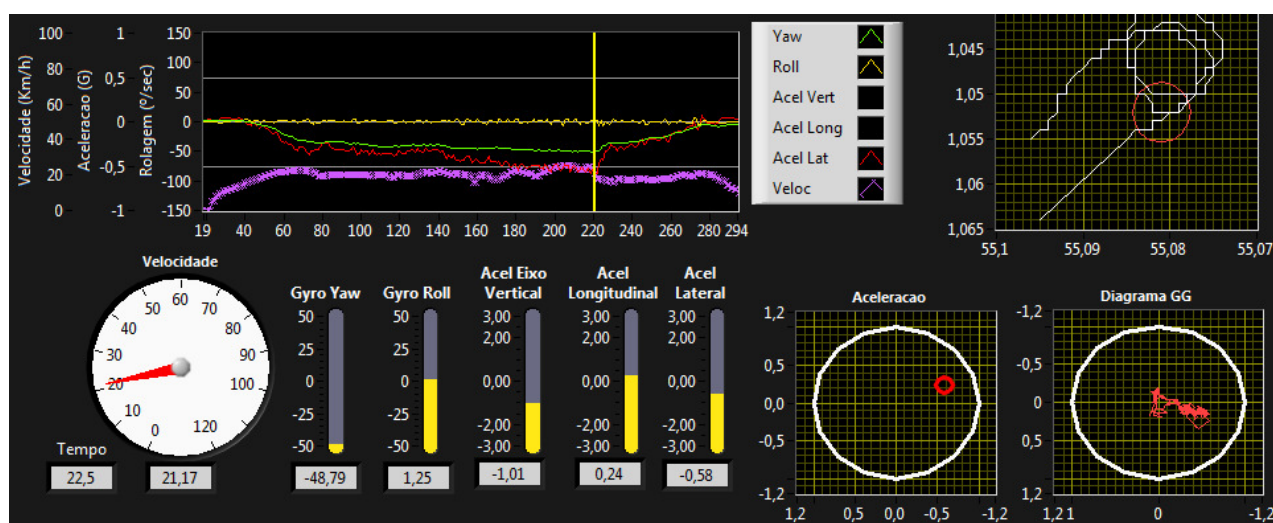


Figura 27 - Análise de teste de *skid pad*. Momento de máxima aceleração lateral.

4.4.3 Teste de *Slalom*

Ao contrário do teste de *skid pad*, que é utilizado para medir o desempenho do veículo em regime transiente, o teste de *slalom* é utilizado para avaliar o desempenho do veículo em regime transiente, em que há mudanças na direção da trajetória.

A figura 28 ilustra um circuito de *slalom*. O objetivo do piloto é desviar dos obstáculos (cones), contornando-os pela direita e pela esquerda alternadamente, realizando a trajetória comumente chamada de “zig-zag”.



Figura 28 – Cones formando um circuito de *slalom*.

Na figura 29 pode-se observar um pequeno trecho de um circuito de *slalom*. O cursor do gráfico está posicionado no momento de máxima aceleração lateral, indicando 0,78 g, ao mesmo tempo em que indica uma grande velocidade de yaw, de 38°/segundo.

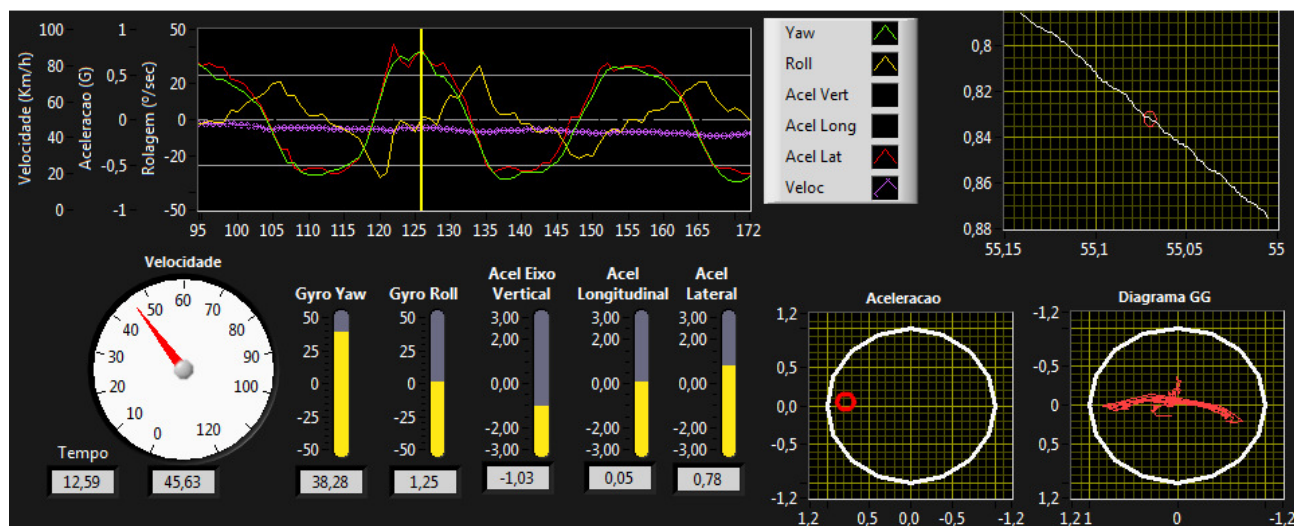


Figura 29 - Análise do teste de *slalom*. Momento de aceleração lateral máxima.

A partir do gráfico da figura 30 é possível observar também que quando o carro muda de direção há grande velocidade de *roll*, pois inércia da carroceria faz com que ela gire em torno do eixo longitudinal.

O cursor indica o momento em que a carroceria já está “rolando”, mas ainda não há velocidade de *yaw*, indicando a dinâmica abortada na seção “forças atuantes em um veículo”: quando submetido a uma mudança de direção, primeiro o veículo “rola” para então começar a trajetória de curva.

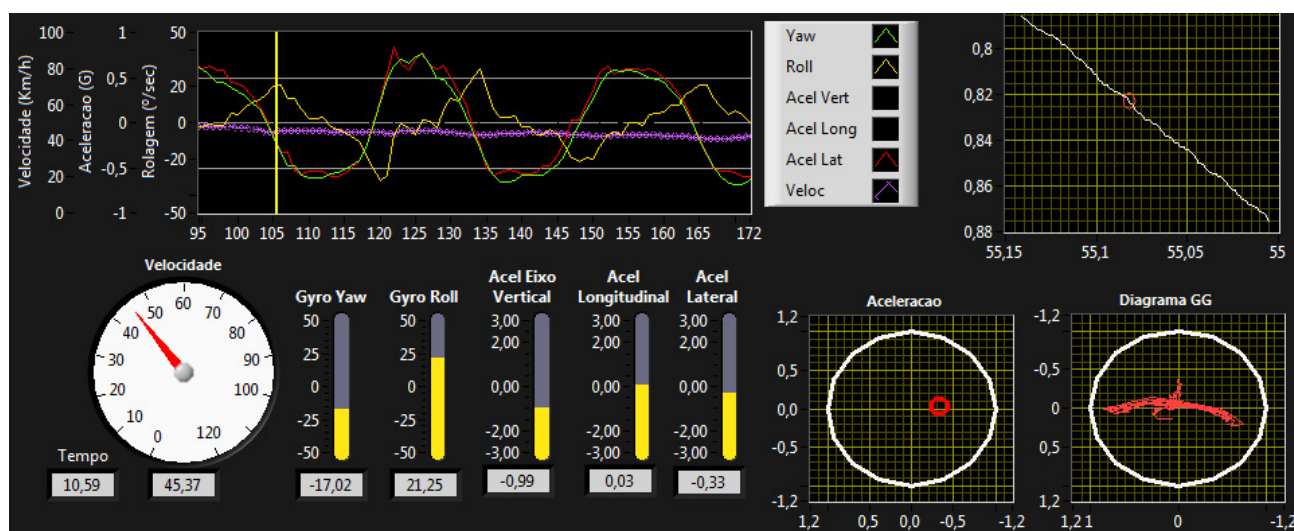


Figura 30 - Análise do teste de *slalom*. Foco na rolagem do veículo.

4.5 Discussões

Durante a programação do microcontrolador foi necessário cuidado com a comunicação serial com o receptor GPS. Este receptor não retransmite as informações e não é sensível a falhas, sendo necessário garantir que todos os *bytes* transmitidos seriam de fato recebidos e armazenados. Este objetivo foi alcançado utilizando-se interrupção de *hardware* para o recebimento de dados pela comunicação serial.

Todas as funcionalidades do módulo foram alcançadas. Conseguiu-se medir as acelerações, velocidades angulares, trajetória e velocidade de translado do veículo.

A análise das informações obtidas nos testes indica que o módulo mediu de forma coerente as forças atuantes no veículo.

Como futuras melhorias, ou próximos objetivos, são propostos os seguintes itens:

- Solução definitiva do problema de travamentos aleatórios do microcontrolador;
- Projeto de uma PCB, tornando o *hardware* menor e mais confiável;
- Montagem da PCB em um recipiente de plástico ou metal, evitando seu contato com poeira e umidade, e facilitando sua fixação no veículo;
- Inclusão de uma interface com cartão SD, eliminando assim a necessidade de um computador conectado ao barramento CAN para a gravação dos dados;
- Cruzamento de dados em *software* para se obter maiores informações. Um exemplo é o cruzamento dos dados da trajetória dada pelo GPS com o ângulo de giro dado pelo giroscópio, determinando assim se o comportamento do veículo é *understeer* ou *oversteer*.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como conclusão um módulo eletrônico com sensores de movimento e posição, um programa que realiza a interface entre o módulo e um computador, e um programa de análise dos dados obtidos.

O módulo é capaz de medir aceleração, velocidade angular, posição na superfície da terra e velocidade de translado. Seu desenvolvimento e os testes realizados focaram no uso em automóveis.

O módulo possui um microcontrolador, interface CAN e três sensores periféricos: um acelerômetro, um giroscópio e um receptor GPS. O microcontrolador é responsável por captar os sinais, formatá-los em mensagens e enviá-las ao barramento CAN.

Foi dada atenção especial à filtragem de ruídos e interferências externas que poderiam causar erros nas leituras dos sinais analógicos. Em cada canal analógico, foi usado um circuito elétrico de filtro passa-baixa e um filtro por *software*, calculando a média entre várias amostras obtidas.

O programa de interface com o módulo funcionou como esperado, indicando os dados na tela do computador em tempo real e ao mesmo tempo armazenando todas as informações em um arquivo de texto.

O programa de análise de dados se mostrou muito útil para a análise posterior das informações, sendo fácil de usar e proporcionando mais funcionalidades que o programa de interface com o módulo.

O veículo de Formula SAE da equipe *Solid Edge* EESC-USP já possui um barramento CAN e um transmissor de rádio frequência conectado ao barramento, formando um sistema de telemetria. A interface CAN desenvolvida neste projeto permitirá que o módulo seja facilmente integrado ao barramento do veículo, fazendo com que todas as mensagens enviadas por ele sejam transmitidas para um computador à distância e disponíveis para visualização e gravação em arquivo.

Este projeto ajudará a equipe *Solid Edge* EESC-USP a levantar dados da dinâmica do veículo, importante para avaliar o projeto de suspensão. Esta informação é muito valorizada na competição de Formula SAE, que incentiva a comparação dos dados reais obtidos com os dados de simulações em computador feitas no início do projeto.

O projeto também auxiliará nos testes de desempenho, permitindo avaliar diferentes ajustes no veículo, e auxiliará também nos testes de piloto, tornando possível analisar diferentes traçados de pistas e situações em que o carro é levado ao limite.

Espera-se que o projeto desenvolvido neste trabalho ajude a melhorar o desempenho do sistema de suspensão da equipe *Solid Edge* EESC-USP e também o desempenho dos pilotos, trazendo bons resultados nas competições nacionais e internacionais, e conquistando prêmios e troféus para a Escola de Engenharia de São Carlos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

SAKAI, R. M. R. **Rede Serial para Comunicação de Dados e Controle em Sistema Embarcado**: Estudo de implementação da ISO 11783. 2008. 119f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

CASAGRANDE, V. L. S. **Estudo e elaboração de uma rede de controle baseada no protocolo CAN para aplicação em eletrônica embarcada**. 44f. Monografia (Graduação em engenharia elétrica) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

MILLIKEN, William. **Race car vehicle dynamics**. 2.ed. Warrendale,PA: SAE, 1995.

BERGER, Arnold S. . **Embedded Systems Design**. 1.ed. Lawrence,KS: CMP Books,2002.

NWAGBOSO, Christopher O. . **Automotive Sensory Systems**. 1.ed. London: Chaman & Hall, 1993.

CATSOULIS, John . **Designing Embedded Hardware**. 1.ed. Sebastopol,CA: O'Reilly Media, Inc, 2003.

GILLESPIE, Thomas D. . **Fundamentals of Vehicle Dynamics**. 1.ed. Warrendale,PA: SAE, 1992.

SEGRS, Jörg. **Analysis Techniques of Racecar Data Acquisition**. 1.ed. Warrendale,PA: SAE, 2008.

SYMON, KEITH R. **MECANICA**. 4.ed Rio de Janeiro: Campus, 1982.

RAMALHO JÚNIOR, Francisco; FERRARO, Nicolau Gilberto; SOARES, PAULO ANTONIO DE TOLEDO. **Os fundamentos da física**. 3. ed São Paulo: Moderna, 1979.

First Test: 2012 Nissan GT-R. Nate Martinez, 2011. Disponível em <http://www.motortrend.com/roadtests/coupes/1102_2012_nissan_gt_r_test/viewall.html>. Acesso em: 24 fev. 2012.

$\pm 3g$, $\pm 11g$ Three Axis Low-g Micromachined Accelerometer. Freescale Semiconductor, 2008. Disponível em: <http://www.freescale.com/files/sensors/doc/data_sheet/MMA7341L.pdf>. Acesso em 24 fev. 2012.

MEMS motion sensor: dual axis pitch and yaw $\pm 30^\circ/s$ analog gyroscope. STMicroelectronics, 2009. Disponível em: http://www.st.com/internet/com/TECHNICAL_RESOURCES/TECHNICAL_LITERATURE/DATASHEET/CD00237199.pdf. Acesso em 24 fev. 2012.

Datasheet of GPS smart antenna module, LS20030~3. Locosys, 2006. Disponível em: <http://www.sparkfun.com/datasheets/GPS/Modules/LS20030~3_datasheet_v1.2.pdf>. Acesso em 24 fev. 2012.

APÊNDICE

1 Custo dos Materiais

Alguns dos componentes difíceis de encontrar no Brasil foram comprados fora do país, nos sites www.mouser.com e www.sparkfun.com. Foram eles: acelerômetro, giroscópio, receptor GPS, regulador de tensão de 3,3 Volts.

O custo de alguns componentes é citado na Tabela 4.

Tabela 4 - Preços de componente e estimativa do total gasto em um módulo.

Componente	Preço Unitário (US\$)
Acelerômetro MMA7341	3,02
Giroscópio LPY503AL	6,72
GPS	59,95
Microchip PIC18F2680	7,47
Transceptor CAN	1,12
Regulador de Tensão TC1264 (3,3V)	1,06

2 Esquemático de Hardware

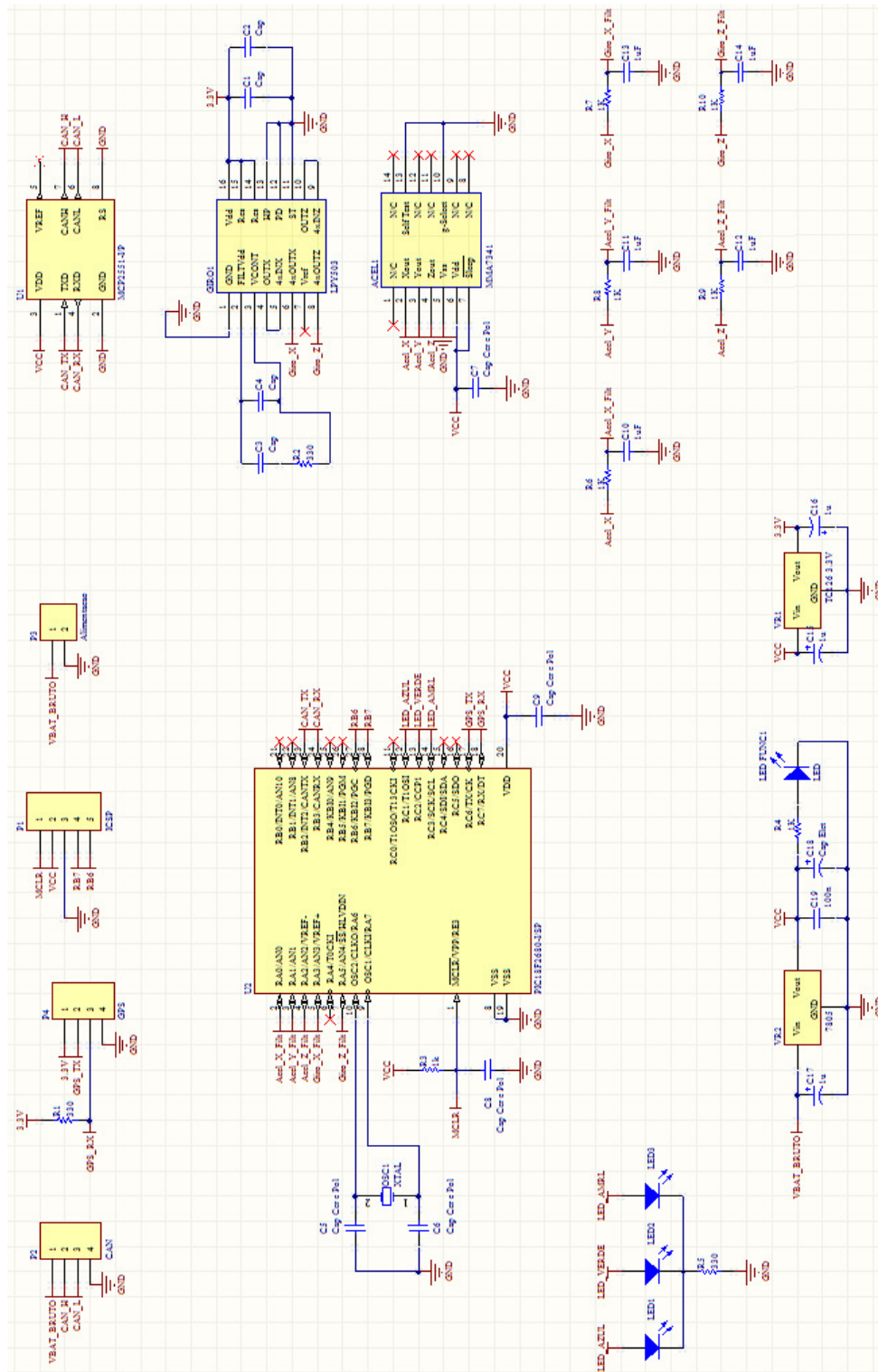


Figura 31 - Esquemático do hardware final.