



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA – UFSC
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA – EEL
CENTRO TECNOLÓGICO – CTC
CAMPUS UNIVERSITÁRIO - TRINDADE - CEP 88040-900
FLORIANÓPOLIS - SANTA CATARINA

Sistema de Telemetria e Painel de Informações para Veículos de Competição

*Monografia submetida à Universidade Federal de Santa Catarina
como requisito para a aprovação da disciplina:
EEL 7890 – Projeto Final*

Acadêmico: Gustavo Leão Moreira
Orientador: Márcio Holsbach Costa, Dr.

Florianópolis, julho de 2011.

Sistema de Telemetria e Painel de Informações para Veículos de Competição

Gustavo Leão Moreira

Esta monografia foi julgada no contexto da disciplina
EEL 7890: Projeto Final
e aprovada na sua forma final pelo
Curso de Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:

Prof. Márcio Holsbach Costa, Dr.
Orientador do Curso de Engenharia Elétrica

Prof. Maurício Valencia Ferreira da Luz, Dr.
Participante da Banca Examinadora

Prof. Eduardo Augusto Bezerra, Dr.
Participante da Banca Examinadora

Agradecimentos

Dedico estas palavras para agradecer todas as pessoas que fizeram parte de mais essa etapa em minha vida, não só nesses últimos meses, no desenvolvimento do TCC, mas em todo o período da graduação. Primeiramente à minha família, que sempre apoiou, incentivou, patrocinou e testemunhou as duras ausências necessárias à criação desse trabalho de conclusão de curso. Meu eterno agradecimento. Agradeço aos ex-companheiros de laboratório de circuitos integrados: Rafael Radin, Luis Spiller, André Orlandi, Osmar Siebel e Daniel Piovanni, que sempre apoiaram a inovação tecnológica e a criação desse TCC.

Agradeço também à Equipe UFSC Baja SAE, por apoiar e fornecer espaço de criação. Aos integrantes Joseph, Rodolfo, Luis Sanchez, Anna Cláudia, Gabriel, Luiz Callado e Roberto Katto e em especial ao Ricardo Marcon e Antonio Duarte, pelo trabalho desenvolvido na área elétrica dos Bajas, ajuda e exemplos de trabalho.

Agradecimento especial à Luiza de Castro pela sempre disposição, dedicação e paciência em fazer a correção e melhoria ortográfica desse trabalho.

E por último, mas não menos importante, aos mestres orientadores, que sempre estavam aptos a ajudar, ensinar e resolver problemas! Meus sinceros agradecimentos aos Professores Márcio Schneider, Márcio Costa e Lauro Nicollazzi.

Resumo

Este trabalho apresenta o projeto e os resultados obtidos de um sistema de instrumentação, telemetria e painel de informações para veículos de competição. Diferencia-se de outros sistemas por possuir mais de 70 canais de leitura, contemplando 13 tipos de sensores distintos, aliado a um baixo custo de fabricação. A metodologia empregada baseia-se na leitura simultânea dos sensores instalados, processamento paralelo das informações, transmissão via radiofrequência, e apresentação dos principais dados à pilotagem em mostradores no painel do veículo. Para validar os sistemas propostos, foram realizadas simulações computacionais nos programas ModelSim e Matlab, onde foi emulado o funcionamento completo do FPGA e desenvolvidas otimizações e definições dos circuitos e componentes utilizados, respectivamente. Finalizando, um protótipo foi construído e os resultados experimentais obtidos são aqui apresentados, comprovando o funcionamento do sistema como um todo.

Sumário

Capítulo 1: Introdução.....	9
Capítulo 2: Instrumentação	13
2.1: Sensor de velocidade e rotação.....	15
2.1.1: Sensor de velocidade e roda fônica.....	15
2.1.2: Temporizadores e algoritmo de cálculo da velocidade	16
2.2: Sistema de posicionamento global.....	18
2.3: Entradas digitais.....	20
2.3.1: Encoder incremental.....	20
2.3.2: Sensor de gasolina.....	21
2.3.3: Posição da marcha e botões.....	23
2.3.4: Comunicação FPGA – expansores digitais	23
2.4: Entradas analógicas.....	24
2.4.1: Sensor de temperatura.....	25
2.4.2: Tensão nos barramentos de alimentação.....	26
2.4.3: Corrente das baterias.....	28
2.4.4: Posição dos pedais.....	29
2.4.5: Comunicação FPGA – conversores ADC.....	29
2.5: Extensômetros e entradas analógicas de precisão	31
2.5.1: Proteção e filtro anti-recobrimento de entrada	32
2.5.2: Amplificador de instrumentação.....	33
2.5.3: Filtro passa-baixa 5a ordem.....	34
2.5.4: Conversor ADC de precisão	36
2.5.5: Fonte de alimentação de precisão	37

2.6: Giroscópio.....	38
2.6.1: Filtro passa-baixas e integral numérica.....	40
2.7: Acelerômetro.....	41
2.7.1: Comunicação acelerômetro – FPGA	41
2.8: Luzes de trânsito.....	41
2.9: Baterias e carregadores.....	43
2.9.1: Baterias.....	43
2.9.2: Carregador baterias.....	44
2.10: Fontes de alimentação.....	47
2.10.1: Fontes chaveadas.....	47
2.10.2: Fonte linear	49
Capítulo 3: Telemetria.....	51
3.1.1: Buffer serial	51
3.1.2: Transceptor de dados.....	53
3.1.2.1: Transceptor veículo.....	54
3.1.2.2: Transceptor estação base	56
Capítulo 4: Painel de informações.....	58
4.1: Mostradores.....	58
4.2: Backlight.....	59
Capítulo 5: Sistema de controle	62
Capítulo 6: Resultados globais.....	65
Capítulo 7: Conclusões e perspectivas.....	69
Bibliografia:.....	71
Apêndice A:	74
Apêndice B:	75
Apêndice C:	79

Apêndice D:.....80

Simbologia

Amp-OP: Amplificador operacional

CI: Circuito integrado

DGPS: Sistema de posicionamento global diferencial (*differential global positioning system*)

EMI: Interferência eletromagnética (*electro-magnetic interference*)

ESD: Descarga eletrostática (*electro-static discharge*)

FPGA: Arranjo de portas programável em campo (*field programmable gate array*)

GND: Terra (*ground*)

GPS: Sistema de posicionamento global (*global positioning system*)

I2C: Interface de comunicação entre circuitos integrados (*inter-integrated circuit*)

In-Amp: Amplificador de instrumentação (*instrumentation amplifier*)

LNA: Amplificador de baixo ruído (*low noise amplifier*)

LSB: Bit menos significativo (*least significant bit*)

MEMS: Sistema micro-eleto-mecânico (*micro-electro-mechanical-system*)

MSB: Bit mais significativo (*most significant bit*)

NTC: Resistor com coeficiente negativo de temperatura (*negative temperature coefficient*)

PCB: Placa de circuito impresso (*printed circuit board*)

PMOS: Transistor de efeito de campo canal P (*P-channel metal-oxide-semiconductor transistor*)

PWR: Alimentação (*power*)

PWM: Modulação por largura de pulso (*pulse width modulation*)

RSSI: Sinal indicador da qualidade da recepção (*received signal strength indicator*)

RX: Recepção de dados (*received data*)

SAE: Sociedade dos engenheiros da mobilidade (*society of automotive engineering*)

SPI: Interface de comunicação serial entre dispositivos (*serial-periferal-interface*)

TPS: Posição da borboleta do acelerador (*throttle position sensor*)

TVS: Supressor de transientes de tensão (*transient voltage supressor*)

TX: Transmissão de dados (*transmitted data*)

UART: Receptor e transmissor universal assíncrono (*universal asynchronous receiver-transmitter*)

Vos: Tensão de off-set de entrada (*voltage offset*)

Capítulo 1: Introdução

A eletrônica veicular está cada vez mais evoluída e complexa, passando de simples reguladores de bateria a sistemas complexos de controle de frenagem e tração, rastreamento, prevenção de colisões e sistemas regenerativos. Para tornar essa evolução possível, foi necessário o conhecimento do comportamento estático e dinâmico do veículo em diversas condições de atuação e, para isso, as competições automobilísticas foram fundamentais [1]. Como exemplo, a Fórmula 1, berço tecnológico em telemetria, aquisição e controle automobilístico, investe anualmente montantes que extrapolam a marca de centenas de milhões de dólares (210 milhões de dólares em 2006) em novos sistemas.

No Brasil, as competições automobilísticas profissionais surgiram há mais de 40 anos, porém sempre dispendo de investimentos mais modestos e utilizando carros de rua como estrutura padrão. A partir de 1995, a sociedade dos engenheiros da mobilidade, para aumentar o interesse e desenvolvimento tecnológico nacional, implementou, no contexto universitário, uma série de competições – contemplando veículos fora-de-estrada, fórmula e aeronaves controladas remotamente – nas quais todas as competições, o projeto, fabricação, testes e otimização estão envolvidos.

Dentre as três competições universitárias, a UFSC mantém representantes em cada uma delas. Contudo, a equipe UFSC Baja SAE merece destaque em virtude da sua história, conquistas e carros desenvolvidos. A mesma projeta e constrói veículos monoposto fora-de-estrada (*Off-Road*) para as competições regulamentadas pela SAE, e conta atualmente com mais de 14 anos de experiência no projeto, fabricação e testes de Bajas, além de ter sido a única na UFSC a ter representado o Brasil em competição internacional.

Este trabalho vem ao encontro da necessidade da Equipe UFSC Baja SAE em possuir um completo sistema eletrônico de aquisição e controle dos seus Bajas. Com este, a equipe poderá realimentar as simulações de comportamento estático/dinâmico do veículo e, assim, dominar o ciclo completo de projeto e a tecnologia associada, além de conseguir otimizar seus carros e alcançar resultados ainda mais expressivos nas competições Baja SAE.



Figura 1: Veículos de competição da Equipe UFSC Baja SAE

O desenvolvimento do sistema eletrônico de aquisição e controle em questão engloba um sistema inovador de instrumentação, telemetria e painel de dados, diferenciando-se dos demais devido ao seu reduzido custo (~ 2,400.00US\$), visto que sistemas semelhantes encontram-se na faixa de dezenas de milhares dólares. Além disso, possui mais de 70 canais com capacidade de leitura de 13 diferentes sensores, transmissão em tempo real dos dados para computador remoto na estação base via link de radiofrequência. Adicionalmente, utiliza circuitos integrados do estado da arte, como por exemplo MEMS.

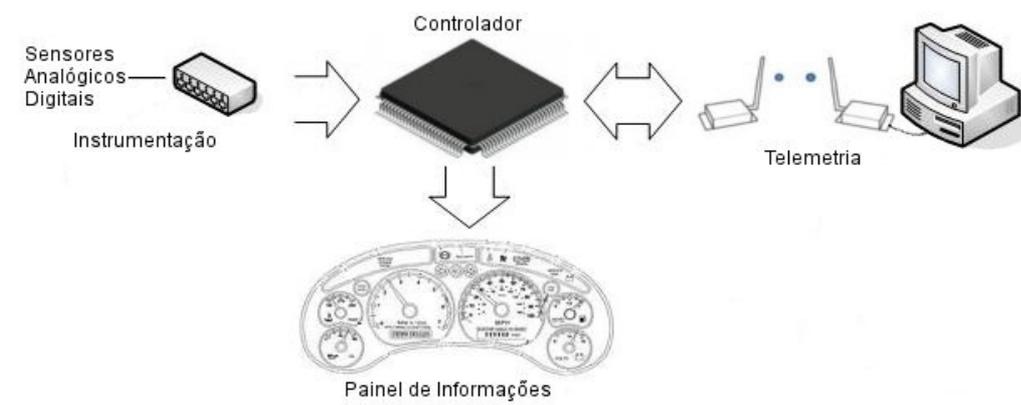


Figura 2: Sistema proposto

Considerando a complexidade de um veículo automotor, onde pode haver mais de 150 sensores instalados [2], decidiu-se, por questões financeiras e de

projeto, capturar somente os principais dados dos sistemas relevantes aos veículos Baja. Estes estão listados a seguir:

- Velocidade das rodas e rotação do motor: permite a avaliação do desempenho do veículo e da transmissão. Também é utilizada para verificação da derrapagem na pista;
- Percurso da pista de teste: via GPS, permite a posterior emulação da pista em questão nos programas de simulação da dinâmica do veículo;
- Posição das suspensões: permite verificar o comportamento da suspensão e otimizar regulagens dos amortecedores para as diferentes pistas;
- Posição do volante: permite verificar a deriva do veículo, assim como o escorregamento lateral;
- Marcha e nível de gasolina: necessários para uma pilotagem segura e verificação da autonomia do veículo, em virtude de diferentes parâmetros (como por exemplo: velocidade, rotação do motor, marcha, etc);
- Temperatura: permite detectar problemas de sub/sobre temperatura no motor, transmissão, eletrônica e baterias, além de verificar o efeito da temperatura no rendimento do carro;
- Tensão nas baterias e barramentos: permite supervisionar o funcionamento de todas as fontes e baterias e detectar se há sub ou sobre tensão;
- Corrente nas baterias: permite acompanhar a dinâmica de carga e descarga nas baterias e detectar possíveis curtos-circuitos;
- Deformações mecânicas: permitem mensurar as deformações mecânicas na estrutura e/ou componentes, para avaliar sua resistência;
- Aceleração: permite medir as forças envolvidas nas acelerações, frenagens, curvas, saltos e quedas;

- Navegação inercial: fornece eixos de referência, independentes da posição do veículo, para análise dos dados;
- Luzes: habilitam o veículo para testes e corridas noturnas;
- Telemetria: permite a transmissão e armazenamento de todos os dados adquiridos, e visualização em tempo real no computador remoto e na estação base;
- Painel de informações: serve como de meio de comunicação entre os dados do veículo necessários à pilotagem e o motorista.

A importância de todos esses sistemas eletrônicos desenvolvidos é de permitir o entendimento do comportamento do veículo, possibilitando à equipe a otimização e criação de veículos mais competitivos e velozes, mantendo sempre a segurança estrutural. Esse conhecimento é adquirido via comparações entre testes práticos/bancada, e/ou através de simulações, que possuem valores de contorno aproximados aos reais, conforme a figura 3.

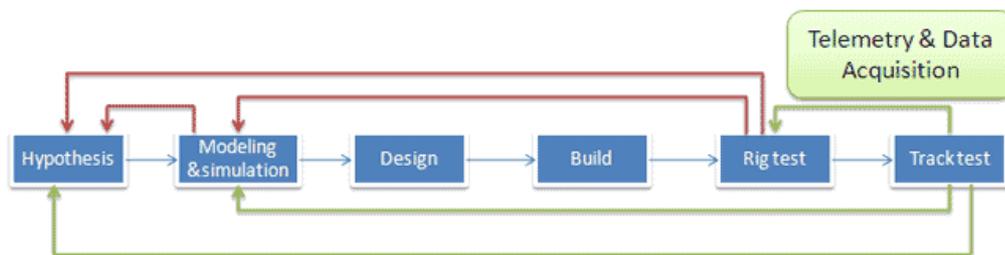


Figura 3: Ciclo de projeto e otimização de veículos utilizando telemetria

Esta monografia é estruturada da seguinte forma: o capítulo 2 descreve o sistema de instrumentação, o qual efetua a leitura, condicionamento, filtragem e processamento de todos os sinais dos sensores utilizados; o capítulo 3 apresenta o sistema de transmissão de informações entre o veículo e o computador remoto na estação base; o capítulo 4 descreve o sistema do painel de informações, que mostra informações úteis do veículo ao motorista; no capítulo 5 é apresentado o controlador de todo o sistema, assim como uma visão geral dos códigos desenvolvidos e o fluxo de desenvolvimento utilizado; no capítulo 6 são apresentados os resultados obtidos; e o capítulo 7 apresenta as conclusões sobre o projeto proposto, além de recomendações para trabalhos futuros.

Capítulo 2: Instrumentação

O sistema de instrumentação é o sistema responsável pela conversão de sinais físicos em dados digitais para transmissão e visualização. Para tanto, a instrumentação é formada por sensores, circuitos de polarização, condicionadores de sinais e conversores analógico-digital.



Figura 4: Sistema de instrumentação da McLaren electronics

Nesse projeto utilizam-se 13 diferentes tipos de sensores. Para que isso fosse possível, diversos circuitos e critérios tiveram de ser implementados, como por exemplo: circuito polarizadores, condicionadores, taxas de amostragem e resolução de conversores. As decisões em relação a esses itens foram tomadas em função da natureza física do sinal mensurado, do tipo de sensor e da banda de comunicação do sistema de telemetria. Valores que mudam lentamente ao longo do tempo, tal como temperatura, são lidos a baixas taxas e em resoluções de alguns graus centígrados, enquanto sinais que flutuam mais rapidamente, como a posição de suspensão, são monitorados frequentemente a taxas mais elevadas e utilizando-se alta precisão [3]. A tabela 1 mostra todos os sensores utilizados, com os seus respectivos pré-requisitos, modelo, taxa de amostragem e resolução desejada.

Tabela 1: Definição dos sensores utilizados

Fenômeno físico mensurado	Requisitos do sistema de sensoriamento	Modelo de sensor utilizado	Amostragem prevista (Hz)	Resolução prevista
Velocidade e rotação	Imune à água/lama/poeira, sem contato eixo-sensor, 6 canais	Sensor Hall ATS665	20	0.1km/h ou 1RPM
Mapeamento da pista	GPS com maior taxa de atualização possível, alta sensibilidade	GPS 10Hz GMM-U1	10	0,0001°lat/lon, 0.1m altura

Posição suspensões e direção	Baixa potência e elevada resolução, 5 canais	Encoder Incremental capacitivo AMT103	50	0,5°
Sensor de marcha	Chave mecânica, 60° de resolução	Chave mecânica rotativa 12 posições/volta	50	1 bit/marcha
Sensor de nível gasolina	Sem contato bóia-sensor, baixa potência	Array de 8 chaves hall A3212 + bóia magnética	1	8 níveis distintos
Sensor de temperatura	Simple e de baixa potência	Resistor NTC automotivo MTE4050	1	5°C
Tensão nos barramentos	Simple, medição da tensão em todos os barramentos e baterias de alimentação	Divisor resistivo de precisão 0,1%	50	50mV
Corrente nas baterias	Medição de corrente bidirecional, lado positivo da tensão da bateria	Resistor shunt 20mΩ + Amplificador MAX4071	50	10mA
Deformações mecânicas	Precisão, ganho ajustável entre 100x até 10000x, 4 canais	Extensômetros em ponte de Wheatstone	100	0.01% de deformação
Entradas analógicas de precisão	Precisão, ganho ajustável, 2 canais	Conversor AD ADS7871	100	14bits
Aceleração	Medição da aceleração nos 3 eixos, 3 acelerômetros, baixa potência	Acelerômetro ADXL345	200	10mg
Navegação inercial	Fornecimento de sistema de referência nos 3 eixos cartesianos	Giroscópio LY530A	10	1° de deriva

O sistema de instrumentação também contempla o controle das luzes de farol e de sinalização, as quais habilitam o veículo para testes e corridas noturnas. Também inclui o controle e gerenciamento das baterias de alimentação utilizadas, os respectivos carregadores, as fontes secundárias de alimentação da instrumentação, a telemetria e o painel de informações.

Nos próximos tópicos serão discutidos em detalhe todos os sensores, listados na tabela 1, além das luzes, baterias, carregadores e fontes de alimentação, incluindo as respectivas características, funcionamento, polarização e implementação prática de cada dispositivo.

Por questões de organização, agrupou-se os sensores analógicos de temperatura, tensão nos barramentos de alimentação e corrente nas baterias (todos compartilham o mesmo ADC) no tópico “Entradas analógicas”, da mesma maneira que os encoders de posição, sensor de gasolina e marcha (compartilham o mesmo sistema de leitura digital) no tópico “Entradas digitais”.

2.1: Sensor de velocidade e rotação

O sistema de medição de velocidade é responsável por capturar a velocidade das quatro rodas e do motor. É constituído pelo sensor de velocidade e roda fônica, temporizador e algoritmo de cálculo da velocidade. Este sistema possui ainda duas entradas extras para uso futuro, e tem o seu valor atualizado a cada 0,02ms.

2.1.1: Sensor de velocidade e roda fônica

A medição da velocidade foi baseada no sensor Hall ATS665, que proporciona imunidade ao sistema a lama/água/poeira. Possui em seu interior um magneto, duas chaves Hall e sistema de processamento; e a sua saída apresenta frequência igual à frequência de passagem dos dentes da roda fônica.



Figura 5: Sensor de velocidade e roda fônica.

A roda fônica (engrenagem de dentes quadrados) tem a função de aumentar a taxa de atualização da velocidade. Para isso, utilizou-se nesse projeto uma roda fônica de 40 dentes em cada uma das rodas e no motor do veículo. A roda fônica é constituída de material com alta permeabilidade magnética para alterar a impedância magnética sentida pelo sensor Hall. Outra vantagem no uso da roda fônica é o processo de fabricação realizado pelo método de corte à laser, o que garante precisão milimétrica e baixo custo.

2.1.2: Temporizadores e algoritmo de cálculo da velocidade

Para mensurar a velocidade, foram desenvolvidos contadores de tempo (timers) e um algoritmo que calcula a velocidade a partir do valor do temporizador.

O temporizador possui uma resolução de $1\mu s$, de forma a mensurar o período (Δt) de passagem entre cada dente da roda fônica (figura 6).

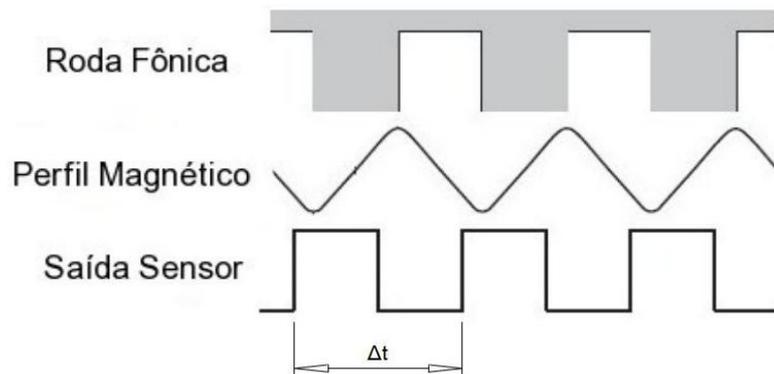


Figura 6: Sistema de leitura de velocidade.

O período mensurado (Δt) é processado pelo algoritmo de cálculo da velocidade, o qual pode processar simultaneamente o valor dos 6 temporizadores e calcular as respectivas velocidades. Essa conversão depende das características do sistema ao qual o sinal está associado, como pode ser visto nas equações (1) à (4). No caso das rodas, a velocidade é dada por:

$$V [km/h] = \frac{K_{vel}}{\Delta t} \cdot Res_{vel} \quad (1)$$

$$K_{vel} = 3,6 \cdot \frac{F_{Timer}}{D_{RF}} \cdot \frac{2 \pi Raio_{Pneu}}{Res_{vel}} = 7650000 \quad (2)$$

Onde:

F_{timer} [Hz]: frequência de incremento do temporizador (1MHz);

D_{RF} : número de dentes da roda fônica (40);

Res_{vel} [km/h/bit]: resolução da velocidade (0,02km/h/bit).

Para o caso da rotação no motor, a velocidade é dada por:

$$V [RPM] = \frac{K_{RPM}}{\Delta t} \cdot Res_{RPM} \quad (3)$$

$$K^{RPM} = 60 \cdot \frac{F_{Timer}}{D_{RF}} \cdot \frac{1}{Res_{RPM}} = 1500000 \quad (4)$$

Onde:

F_{timer} [Hz]: frequência de incremento do temporizador (1MHz);

D_{RF} : número de dentes da roda fônica (40);

Res_{RPM} [RPM/bit]: resolução da rotação (1rpm/bit).

A partir dessas equações, o sistema consegue mensurar velocidades máximas de $(2^{12}-1) \cdot 0,02 = 81,90$ km/h e mínimas de $1 \cdot 0,02 = 0,02$ km/h, assim como uma rotação máxima de $(2^{12}-1) \cdot 1 = 4095$ rpm e mínima de $1 \cdot 1 = 1$ rpm.

Para obter a velocidade mínima desejada, o temporizador conta até 7650000. Aplicando-se o logaritmo na base 2, descobre-se que o temporizador precisa ser de 23bits, porém, por questões de arredondamento e padrões, definiu-se que o temporizador seria composto por 24bits.

Para facilitar a troca de informações e processamento, e visando também a operação dos dados em ponto fixo, os valores da velocidade e da rotação são sempre transmitidos ao painel e à telemetria como sendo o resultado da velocidade dividido pela respectiva resolução.

Os valores de velocidade e rotação mostrados no painel são provenientes do sensor de velocidade da roda traseira e do motor, respectivamente. As outras velocidades adquiridas são utilizadas exclusivamente para telemetria. Escorregamentos devido à tração nas diversas condições de estrada podem ser obtidas fazendo-se a comparação entre a velocidade das rodas dianteiras com a das traseiras, como também comparando-se a velocidade proveniente dos sensores instalados com a velocidade fornecida pelo GPS.

2.2: Sistema de posicionamento global

O sistema de posicionamento global (GPS) é um sistema de navegação por satélite, que fornece ao aparelho receptor a sua posição, assim como informação horária, sob todas e quaisquer condições atmosféricas, a qualquer momento e em qualquer lugar na Terra. Nesse trabalho, o GPS tem a função de mapear a pista na qual o veículo se desloca, assim como fornecer a velocidade do veículo via satélite e servir de meio de calibração da direção dos giroscópios e do magnetômetro no plano terrestre, além de fornecer base de tempo ao sistema.

Foi escolhido o modelo de GPS (GMM-U1) da GlobalTop devido aos seguintes diferenciais em relação aos demais modelos [21]:

- Taxa de atualização dos dados de 10Hz;
- Consumo ultra baixo: 48mA durante aquisição e 37mA em rastreo;
- Sensibilidade ultra alta de -165dBm;
- Suporta DGPS.

O FPGA recebe todas as informações do GPS a cada 0,1s via porta UART, de acordo com o padrão NMEA0183. Porém, somente as seguintes informações são repassadas para ao sistema de telemetria:

- Coordenadas (latitude, longitude e altitude);
- Data e hora de Greenwich;
- Velocidade em terra, direção do movimento;
- Status do GPS (3D, 2D, DGPS, Autônomo).

Na implementação prática, foi necessário garantir o casamento de impedância entre o GPS e o conector SMA da antena. Desse modo, a largura da trilha na placa de circuito impresso foi especificada para possuir impedância intrínseca de 50Ω. Utilizando-se da fórmula de microstrip, e dos parâmetros fornecidos pela empresa fabricante da placa de circuito impresso, calculou-se o valor da largura de trilha para impedância desejada como [4]:

$$Z_0 = \frac{87}{\sqrt{\epsilon_r + 1,41}} \cdot \ln\left(\frac{5,98 \cdot H}{0,8 \cdot W + T}\right) \quad (5)$$

Arranjando a equação para a variável de interesse, tem-se:

$$W = \frac{5,98 \cdot H}{0,8} \cdot e^{\left(-Z_0 \frac{\sqrt{\epsilon_r + 1,41}}{87}\right)} - \frac{T}{0,8} \quad (6)$$

Onde:

Z_0 = impedância desejada (50Ω);

ϵ_r = permeabilidade relativa (4,8 para placas FR4);

H = espessura do substrato (1,6mm);

T = espessura do cobre ($\frac{1}{2}$ Oz/ft² = 17,5μm);

W = largura da trilha (mm).

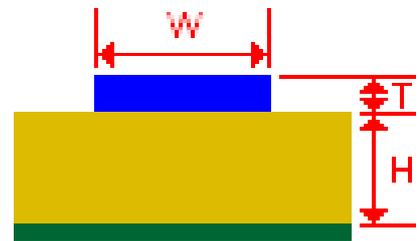


Figura 7: Linha Microstrip.

Fazendo a substituição dos valores na equação 6, obtém-se $W = 2,83$ mm.

Devido à sensibilidade do módulo GPS em relação à tensão de alimentação e ao ruído, utilizaram-se reguladores lineares e capacitores de alto fator de qualidade exclusivos para alimentar o módulo e a antena. Da mesma forma, na placa de circuito impresso foi construído um plano terra abaixo e ao redor do módulo GPS.

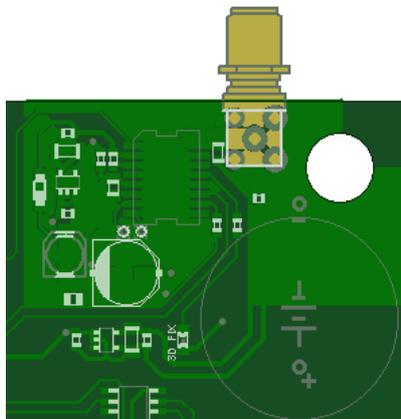


Figura 8: Layout da PCB com GPS.

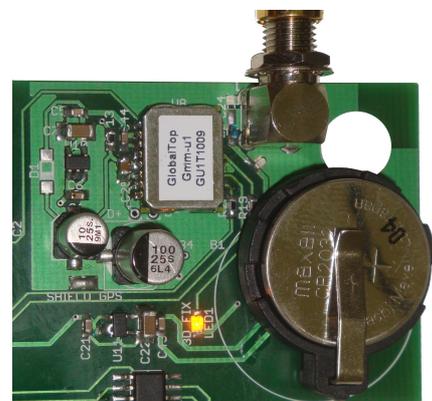


Figura 9: PCB funcionando com GPS.

2.3: Entradas digitais

As entradas digitais são utilizadas para a leitura de sensores e chaves que possuem saída binária. Nesse projeto, houve a necessidade de utilizar expansores de entradas digitais, devido à pequena quantidade de pinos de entrada e saída disponíveis pela placa NexysII. No total, foram utilizados dois expansores de 16bits cada (MCP23016), totalizando um acréscimo de 32 pinos de entrada/saída digitais. Entretanto, todos são utilizados como entradas para os seguintes sensores/dispositivos:

- Encoder incremental: posição da direção;
- Encoder incremental: posição da balança da suspensão dianteira esquerda;
- Encoder incremental: posição da balança da suspensão dianteira direita;
- Encoder incremental: posição da balança da suspensão traseira esquerda;
- Encoder incremental: posição da balança da suspensão traseira direita;
- Nível de gasolina;
- Posição da marcha e botões.

2.3.1: Encoder incremental

O encoder incremental é o sensor utilizado para mensurar deslocamentos angulares. A sua posição é dada por pulsos de saída a partir de pulsos de referência. Utilizou-se neste projeto o modelo de encoder incremental AMT-103 devido às seguintes características [20]:

- Encoder capacitivo incremental de 3 canais;
- Resolução programável entre 48~2048pulsos/volta;
- Baixo consumo (6mA);

- Tamanho reduzido.



Figura 10: Encoder AMT-103.



Figura 11: Encoder instalado na caixa de direção.

Devido a limitação da taxa de atualização das entradas digitais, calculou-se a resolução do encoder para que o sistema de leitura não perdesse a posição destes. A equação 7 ilustra o cálculo.

$$Resolução_{maxima} = F_{refresh} \cdot W_{read} \cdot \frac{1}{\omega_{maximo}} \cdot 360^{\circ} \quad (7)$$

Onde:

$F_{refresh}$ [Hz]: frequência de leitura das entradas digitais (1,6kHz);

W_{read} : janela de detecção de movimento no encoder ($45^{\circ}/360^{\circ}$);

ω_{maximo} [°/s]: velocidade máxima do encoder da posição da suspensão ($250^{\circ}/s$) – extraído via simulação de um capotamento do Baja no software ADANS/CAR.

Substituindo os dados na equação 7, tem-se: $Resolução_{maxima} = 288$ pulsos/volta. O valor mais próximo proporcionado pelo encoder é de 256 pulsos/volta, conseguindo, desse modo, detectar variações angulares de $1,40625^{\circ}$. Após a leitura do encoder, é feita a transformação do sinal incremental para a forma absoluta via FPGA.

2.3.2: Sensor de gasolina

O sensor de gasolina é um sistema utilizado para mensurar o nível de gasolina dentro do tanque de combustível. Comercialmente esse sistema é

composto por um potenciômetro e uma bóia. No projeto, porém, devido à proibição de furos no tanque, desenvolveu-se um sistema de leitura remoto, no qual utiliza-se uma bóia magnética e seu guia mecânico, que encontram-se instalados internamente ao tanque (figura 12). Externamente, é fixada a placa sensora baseada em sensores Hall. A bóia magnética desloca-se verticalmente de acordo com o nível de gasolina, e a placa sensora detecta a posição da bóia através da leitura dos sensores Hall com 8 níveis distintos, conforme figura 13.



Figura 12: Tanque contendo bóia e guia.



Figura 13: Placa sensores Hall.

No desenvolvimento da bóia, utilizou-se o programa MatLAB para verificar a flutuabilidade (Figura 14) da mesma em relação às suas dimensões (apêndice A).

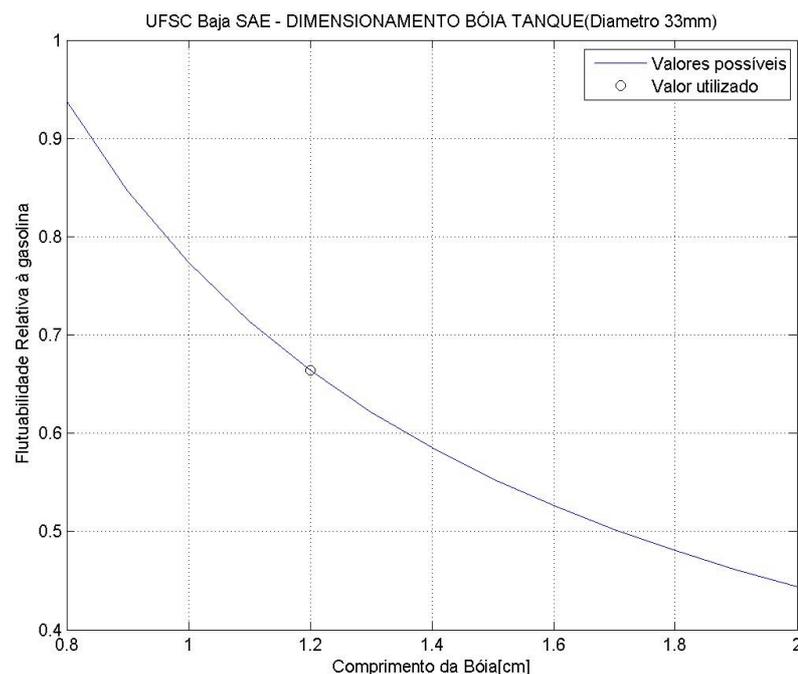


Figura 13: Projeto da bóia magnética.

Após a leitura do sensor, é realizada uma filtragem passa-baixa digital e aplicada uma função de histerese digital para prevenir oscilações no mostrador de nível de combustível.

2.3.3: Posição da marcha e botões

A posição de marcha é uma das informações mais importantes para o piloto do veículo, pois indica qual marcha está engatada na caixa de câmbio. Para tanto, foi utilizada uma chave rotativa mecânica com 12 posições/volta e contatos do tipo *MBB* (*Make-Before-Break* – onde, na comutação, a chave fecha um novo contato antes de abrir o contato antigo. Assim, nunca haverá posição onde a chave está com seu contato em aberto) acoplada diretamente ao sistema mecânico de troca de marcha mecânico, conforme a figura 15.

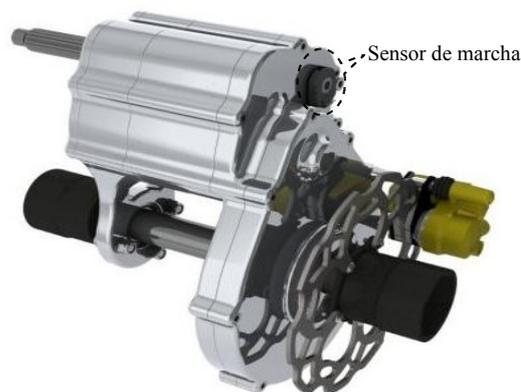


Figura 15: Sensor de marcha acoplado à caixa de câmbio.

Os botões disponibilizados servem para configurar e comandar o sistema do painel e telemetria. Foram utilizados botões selados do tipo AQUAMEC para garantir o correto funcionamento do sistema, mesmo sob condições ambientais não-favoráveis (água/lama/poeira).

2.3.4: Comunicação FPGA – expansores digitais

O controle digital dos expansores é feito via protocolo I2C Standart Mode, estando os dois circuitos integrados no mesmo barramento, porém com endereços

distintos. A comunicação de dados entre os expansores e o FPGA pode ser visto na figura 16.

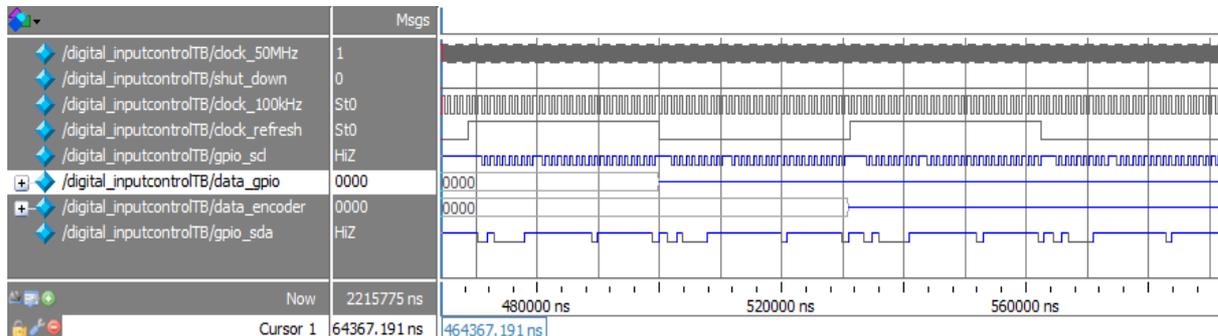


Figura 16: Simulação da comunicação FPGA – PCA9515.

Percebe-se que o barramento I2C está praticamente 100% ocupado. Com a taxa de comunicação de 100kHz e 60bits de dados, conseguiu-se uma taxa de atualização máxima de 1,6kHz. Esse valor, apesar de ser extremamente alto para os botões, marcha e sensor de gasolina, é baixo para os encoders. Desse modo, é necessário migrar a comunicação I2C do modo standard (100kHz) para o modo Fast (400kHz), a fim de que seja permitida a utilização dos encoders com a resolução adequada. Com essa mudança, a comunicação seria 4 vezes mais rápida, assim como a taxa de atualização, que atingiria uma resolução 4 vezes maior – 1024pulsos/volta e $0,3515625^\circ$ de precisão.

2.4: Entradas analógicas

O conversor analógico digital é um dispositivo eletrônico capaz de gerar uma representação digital a partir de uma grandeza analógica, normalmente um sinal representado por um nível de tensão ou intensidade de corrente elétrica. Nesse projeto, serão utilizados dois conversores analógico-digitais para mensurar temperatura, tensão nos barramentos de alimentação, corrente nas baterias e posição dos pedais – totalizando 16 canais. O conversor utilizado foi o ADC TLV1548, que apresenta as seguintes características:

- Resolução de 10 bits;

- Power down mode (1 μ A);
- 8 canais analógicos;
- Conversor do tipo aproximações sucessivas (SAR).

2.4.1: Sensor de temperatura

O sensor de temperatura NTC (*Negative Temperature Coefficient*) é um resistor que possui coeficiente de variação de resistência inversamente proporcional à temperatura. Os NTCs são utilizados para mensurar a temperatura no motor, transmissão, redução final e nas baterias de Li-ION. Também são largamente utilizados em veículos automotores convencionais.

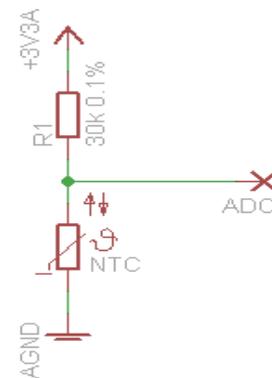


Figura 17: Sensor NTC MTE4050.

Figura 18: Circuito de polarização do NTC.

O método utilizado na leitura desses sensores é do tipo divisor de tensão, conforme pode ser visualizado na figura 18. A utilização desse método de polarização possui a vantagem da simplicidade, porém, devido à não-linearidade da curva de calibração do NTC, a precisão é reduzida em elevadas temperaturas e há acréscimo da corrente de polarização, ao contrário do que acontece em temperaturas mais baixas, como ilustrado na figura 19. No entanto, mesmo com essas variações, consegue-se atingir a resolução desejada de 5°C na faixa de -10°C a 90°C, conforme tabela 2.

Tabela 2: Tabela de calibração NTC.

Temperatura[°C]	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
Valor Lido ADC[bits]	445	377	316	261	213	173	140	113	91	74	61	50	41	34	28	23	19	16	14	12	10	9	7

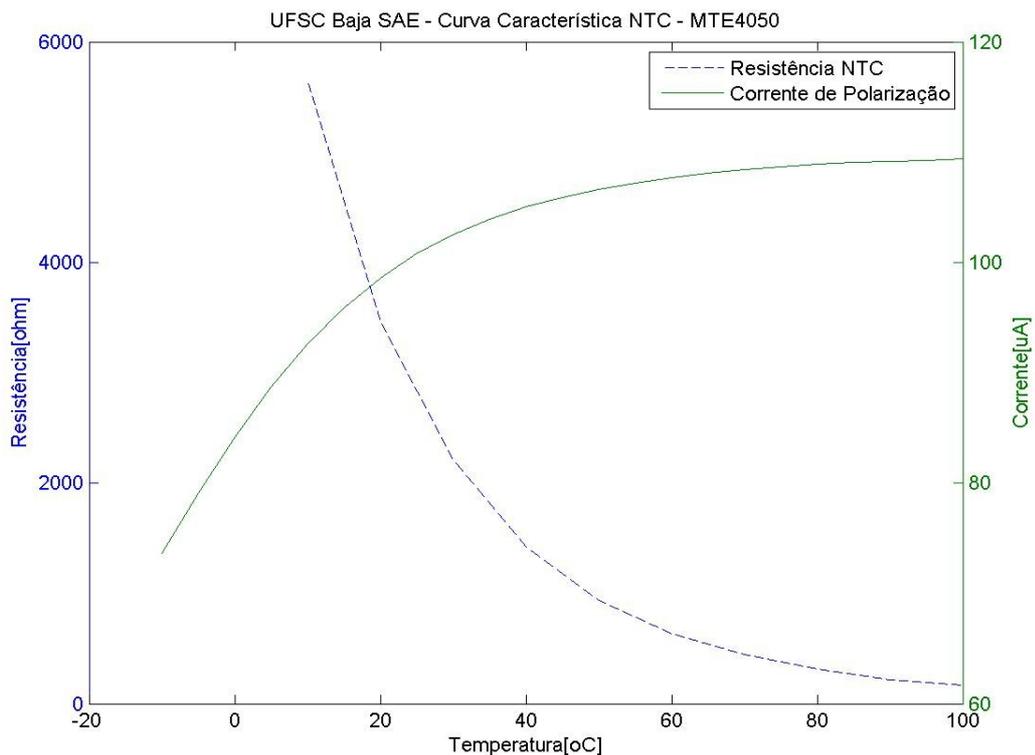


Figura 19: Curva característica NTC.

2.4.2: Tensão nos barramentos de alimentação

A medição dos barramentos de alimentação do sistema tem a função de monitorar a tensão das baterias. Esse monitoramento detecta anormalidades nas alimentações, e avisa automaticamente, via telemetria, a anormalidade na qual o veículo se encontra para a equipe localizada na estação base, assim como para o piloto, através da luz indicativa no painel.

O monitoramento das tensões de alimentação engloba as quatro baterias que alimentam o sistema, além das tensões secundárias de 5V e 3,3V para os sistemas digitais, e 3,3V para alimentação dos sistemas analógicos. Para tanto, utiliza-se um sistema de condicionamento de sinais, formado por um divisor resistivo e filtro passa-baixas analógico para adequar o valor destas tensões aos limites adequados do conversor ADC (2.5V), conforme figura 16. O capacitor do filtro passa-baixas também serve de caminho de baixa impedância para alimentar as entradas do ADC,

reduzindo, desse modo, erros devido à elevada impedância de saída do divisor resistivo.

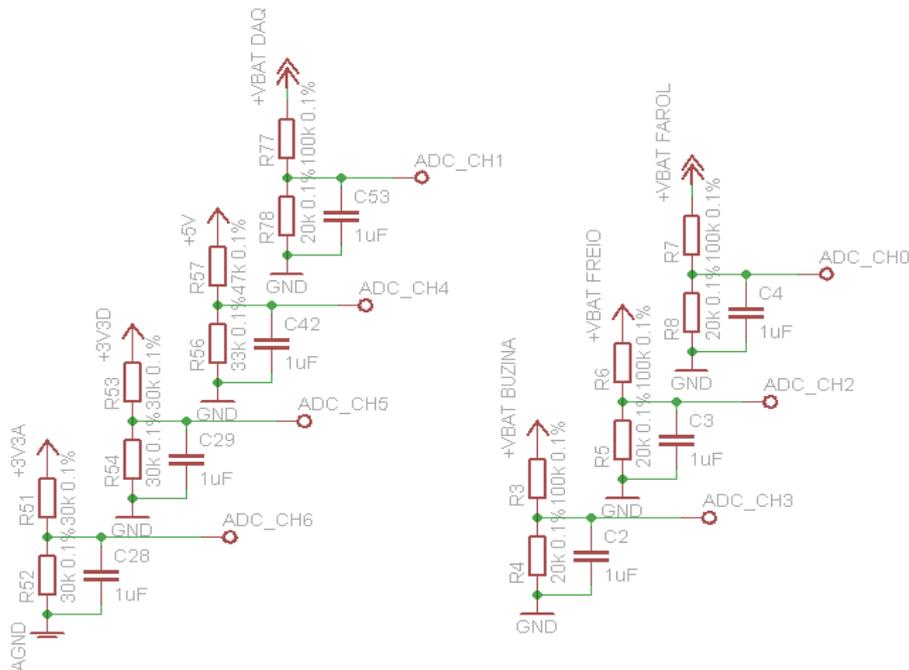


Figura 19: Divisor resistivo para medição das tensões nos barramentos.

Na Tabela 3 podem ser visualizados os valores adquiridos e os erros do sistema de medição das tensões nas baterias e barramentos em um experimento em laboratório.

Tabela 3: Cálculo das tensões e valores convertidos das baterias e barramentos.

	Vin(V)	R1(kΩ)	R2(kΩ)	Razão Divisão	Vin _{ADC} (V)	Vref(V)	Valor Esperado(Dec)	Valor Lido(Dec)	Erro(bits)	Erro(mV)	Vin Calculado(V)
Bateria Farol	12.17	100	20	0.1667	2.03	2.51	826	826	0	0	12.17
Bateria DAQ	7.69	100	20	0.1667	1.28	2.51	522	520	2	29.33	7.66
Bateria Freio	10.67	100	20	0.1667	1.78	2.51	724	722	2	29.33	10.64
Bateria Buzina	10.67	100	20	0.1667	1.78	2.51	724	722	2	29.33	10.64
Bus 5V _{Digital}	5.00	47	33	0.4125	2.06	2.51	840	838	2	11.85	4.99
Bus 3.3V _{Digital}	3.31	30	30	0.5000	1.66	2.51	674	675	1	4.89	3.32
Bus 3.3V _{Analogico}	3.30	30	30	0.5000	1.65	2.51	672	672	0	0	3.30

Onde:

Vin: tensão na bateria ou barramento (Medido com o voltímetro);

Razão Divisão: razão do divisor resistivo ($R2/\{R1+R2\}$);

Vin_{ADC}: tensão na entrada do ADC ($Vin \cdot \text{Razão Divisão}$);

Vref: tensão de referência do ADC;

Valor Esperado: valor esperado da conversão para digital do sinal V_{in_ADC} em decimal ($V_{in_ADC} \cdot 1023 / V_{ref}$);

Valor Lido: valor (em formato decimal) da conversão para digital do sinal V_{in_ADC} ;

Erro_{bits}: diferença entre valor lido e valor esperado ($|\text{Valor Lido} - \text{Valor Esperado}|$);

Erro_{mV}: diferença de tensão devido ao erro de amostragem e conversão do ADC ($\{V_{ref}/1023\} \cdot \{\text{Erro}_{bits}/\text{Razão Divisão}\}$);

Vin Calculado: valor de tensão no barramento ou bateria, calculado via valor lido do conversor AD ($\text{Valor Lido} \cdot V_{ref}/1023$).

2.4.3: Corrente das baterias

As baterias utilizadas no acionamento da luz de freio, buzina e sistema de telemetria/aquisição/painel possuem sensores externos de corrente bidirecional, que informam a intensidade e a direção da corrente que flui pelas baterias. Para tal mensuração, foram utilizados resistores *shunt* de 20mΩ entre o positivo das baterias e as suas respectivas cargas (foi utilizado o método a 4 pontas Kelvin [26] para medição da queda de tensão devido a corrente). A queda de tensão sobre os resistores *shunt*, causada pelo fluxo de corrente é amplificada (MAX4071), condicionada e enviada ao conversor AD. O circuito utilizado para a medição de corrente pode ser visualizado na figura 19:

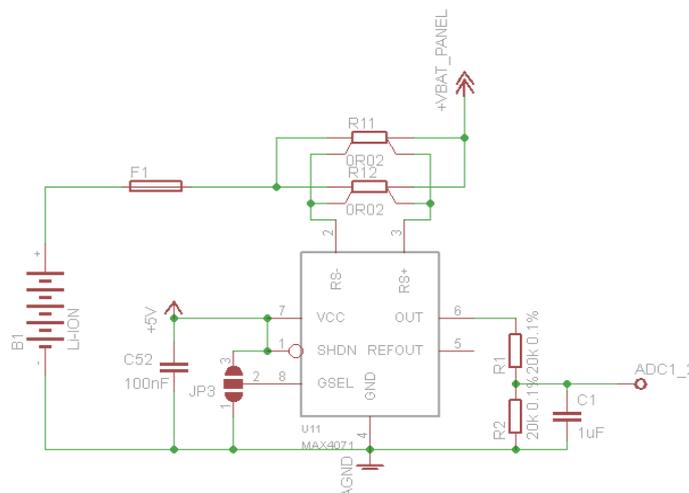


Figura 19: Sensor de corrente da bateria da telemetria/aquisição/painel.

2.4.4: Posição dos pedais

Duas entradas analógicas disponíveis foram utilizadas para os sensores de posição dos pedais de acelerador e freio. O sensor escolhido foi do tipo potenciométrico blindado, em virtude do veículo Baja ser do tipo Off-Road e sujeito a condições ambientais hostis (lama/poeira/água). Foi utilizado um sensor automotivo de posição da borboleta do acelerador (TPS) a sua linearidade e robustez.



Figura 20: Sensor potenciométrico TPS.

2.4.5: Comunicação FPGA – conversores ADC

O controle e leitura dos dois conversores AD (ADC1 e ADC2) é efetuado pelo FPGA via barramento SPI. Ambos compartilham o mesmo barramento, porém cada ADC possui o próprio sinal de seleção (*Chip Select*). Na parte da leitura, devido à baixa taxa de atualização, utiliza-se o modo de baixo consumo (*sleep mode*) do conversor quando este não está convertendo, de acordo com o seguinte método:

1. A cada borda de subida do sinal de atualização(50Hz), o conversor ADC 1 é acordado do modo sleep;
2. Todos os oito canais do conversor ADC 1 são lidos;
3. O conversor ADC 1 é colocado em modo sleep;
4. O conversor ADC 2 é acordado do modo sleep;
5. Todos os oito canais do conversor ADC 2 são lidos;
6. O conversor ADC 2 é colocado no modo sleep;
7. Ambos os conversores esperam em modo sleep até 1 se repetir.

Com isto, consegue-se reduzir o consumo de corrente em:

$$I_{AVG} = \frac{T_1 \cdot (I_{CC} - I_{CC(SLEEP)})}{T} + I_{CC(SLEEP)} \quad (8)$$

Onde:

T_1 : período conversor ligado (1,385ms);

T : período do sinal de atualização (20ms);

I_{cc} : corrente consumida durante conversão (400 μ A);

$I_{cc(SLEEP)}$: corrente consumida durante modo sleep (1 μ A).

Substituindo os valores na equação 8, tem-se:

$$I_{AVG} = \frac{1,385(400-1)}{20} + 1 = 28,63 \mu A \quad (9)$$

Como são utilizados dois ADCs, a corrente média total é de 28,63 μ A+28,63 μ A = 57,26 μ A. Comparando este valor com a corrente média caso os dois ADCs estivessem sempre ligados: 400 μ A+400 μ A = 800 μ A. Tem-se uma economia de energia de:

$$Economia(\%) = \left(\frac{800 - 57.26}{800} \right) \cdot 100 = 92,8\% \quad (10)$$

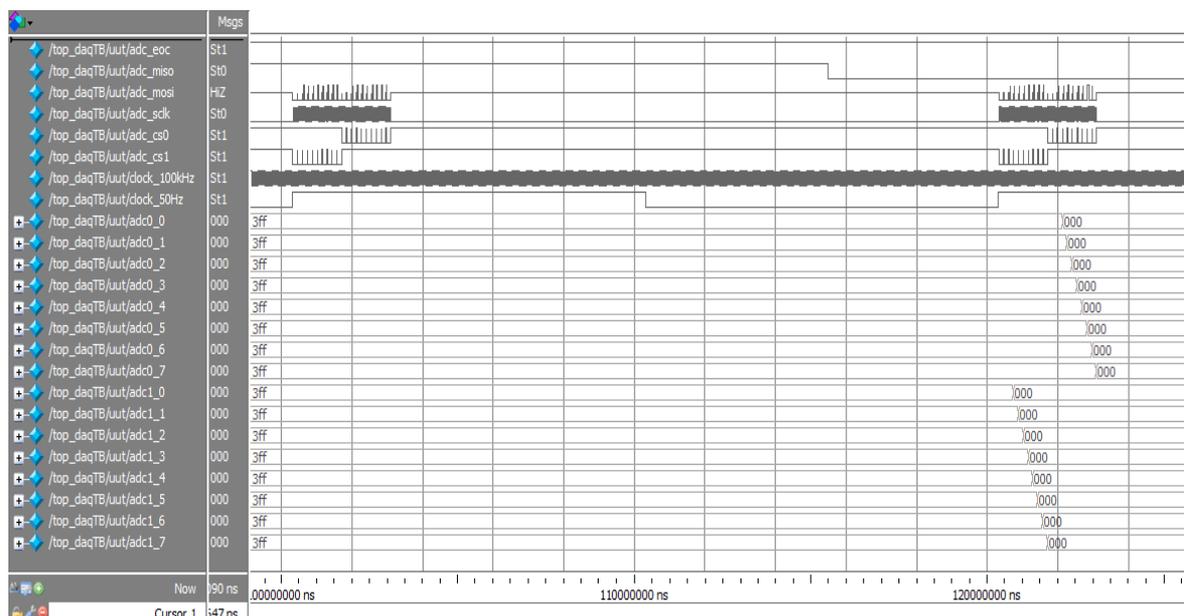


Figura 21: Simulação comunicação FPGA – ADCs.

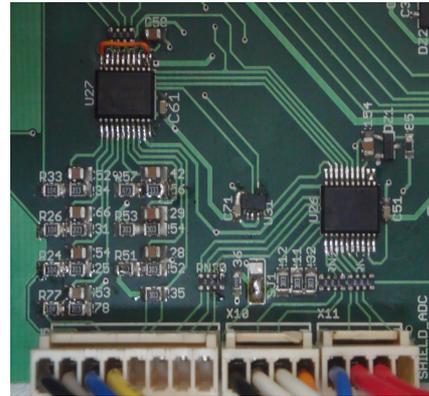
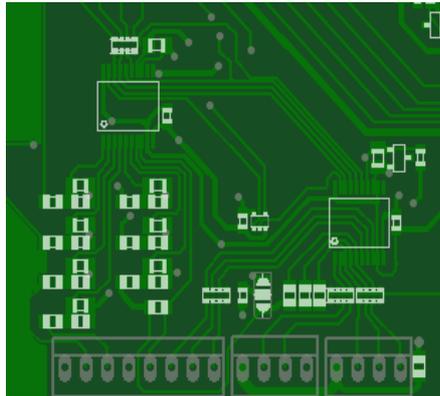


Figura 22: Layout da PCB dos ADCs. Figura 23: PCB com ADCs funcionando

2.5: Extensômetros e entradas analógicas de precisão

A extensometria é a técnica utilizada para a análise experimental de tensões e deformações em estruturas mecânicas. Essas estruturas apresentam deformações sob carregamento ou sob efeito da temperatura. Desse modo, para uma otimização de projeto estrutural do veículo, é importante conhecer a extensão dessas deformações. Existem vários métodos de se medir a deformação de um corpo sob ensaio, e nesse trabalho optou-se pelo uso de extensômetros de resistência elétrica, os quais possuem resistência elétrica modulada pela deformação mecânica submetida.

O sistema de extensometria proposto é formado por um circuito de proteção na entrada, amplificador de instrumentação, filtro passa-baixas de 5ª ordem, conversor ADC de precisão com ganho variável e fonte de tensão de precisão. Este sistema possui as seguintes características:

- 4 canais para extensômetros com ganho selecionável via hardware e software entre 20000V/V~100V/V;
- 3 canais extras de entradas analógicas de precisão com ganho selecionável via software de 20V/V~1V/V;
- Frequência de amostragem 400Hz;
- Baixo consumo.

2.5.1: Proteção e filtro anti-recobrimento de entrada

A proteção e o filtro na entrada do amplificador de instrumentação são utilizados para que descargas eletrostáticas provenientes do manuseio/instalação dos extensômetros não danifiquem o circuito implementado, além de servir como filtro anti-aliasing. Essa proteção é formada por resistores e capacitores de baixa tangente de perdas, para não influenciar o sinal de entrada de baixa relação sinal-ruído.

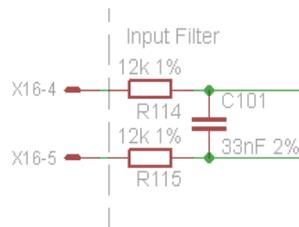


Figura 24: Proteção e filtro de entrada

A frequência de corte do filtro foi selecionada de modo que impedisse que sinais de alta frequência provenientes das fontes chaveadas interferissem nas medidas. Assim, selecionou-se o valor dos resistores e capacitor como:

Capacitor: maior valor comercial com baixa tangente de perdas (33nF);

Resistor: De acordo a equação 11.

$$R_s = \frac{1}{(2\pi \cdot 2 \cdot F_s \cdot C)} = \frac{1}{(2\pi \cdot 2 \cdot 1\text{kHz} \cdot 33\text{nF})} = 2,4 \text{ k}\Omega \quad (11)$$

Por questão de facilidade de implementação, utilizaram-se resistores de 1k Ω de 1% de tolerância, resultando a frequência do corte do filtro em 2,4kHz (muito abaixo da frequência de funcionamento das fontes chaveadas - 800kHz). A inserção dos resistores de 1k Ω em série com a entrada do amplificador de instrumentação (impedância de entrada de 3M Ω) causam um erro de leitura de:

$$Error(\%) = \left(1 - \frac{3\text{M}\Omega}{2 \cdot 1\text{k}\Omega + 3\text{M}\Omega}\right) \cdot 100\% \approx 0,065\% \quad (12)$$

Por ser constante, esse erro pode ser removido por intermédio de pós-processamento, multiplicando o valor convertido do ADC de precisão por $(1+0.065\%) \approx 1.00065$.

2.5.2: Amplificador de instrumentação

O amplificador de instrumentação (In-Amp), elemento com maior influência na relação sinal/ruído de todo o sistema, é responsável pela amplificação do baixíssimo sinal diferencial de entrada. No projeto, utilizou-se uma configuração formada por 2 amplificadores operacionais, que oferece baixa relação custo/benefício em baixas frequências na comparação com a formada por 3 amplificadores operacionais.

Para o cálculo do ruído total, verificou-se a densidade espectral de ruído na entrada do amplificador de instrumentação (ISL28470), através do gráfico disponibilizado pelo fabricante [9]. Integrando numericamente essa curva, obtém-se com o auxílio do MatLAB, o ruído total presente na entrada diferencial do circuito, conforme a figura 20. O ruído térmico dos resistores de proteção, o filtro anti-recobrimento de entrada e o do cabo e dos extensômetros não foram levados em conta no cálculo do ruído total, pois sua influência é de uma ordem de magnitude muito menor que o ruído presente na entrada do amplificador de instrumentação.

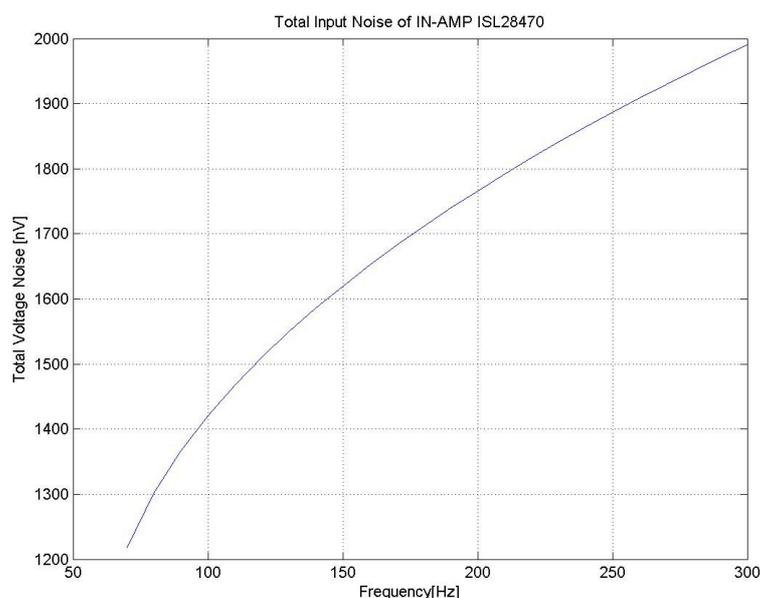


Figura 24: Ruído RMS presente na entrada do In-Amp.

A frequência de corte do sistema foi configurada para 200Hz, assim o ruído total estimado na entrada é de cerca de $1,8\mu V_{rms}$. Para uma relação sinal/ruído (SNR) de aproximadamente 34dB (50:1), a amplitude do sinal de entrada deve ser de, no mínimo, $90\mu V_{rms}$.

O ganho do amplificador de instrumentação é selecionável por intermédio de 4 chaves. A tabela 4 mostra a combinação das chaves e o respectivo ganho:

Tabela 4: Ganhos do Amplificador de instrumentação.

SW1	SW2	SW3	SW4	GANHO(V/V)
OFF	OFF	OFF	OFF	N/A ¹
OFF	OFF	OFF	ON	1001 ²
OFF	OFF	ON	OFF	1001 ²
OFF	OFF	ON	ON	501 ²
OFF	ON	OFF	OFF	201 ²
ON	OFF	OFF	OFF	201 ²
OFF	ON	OFF	ON	166.67
OFF	ON	ON	OFF	166.67
ON	OFF	OFF	ON	166.67
ON	OFF	ON	OFF	166.67
ON	ON	OFF	OFF	101 ²
OFF	ON	ON	ON	91.91
ON	OFF	ON	ON	91.91

¹N/A: Não permitido

²Valores padrão

2.5.3: Filtro passa-baixa de 5^a ordem

A filtragem passa-baixa é utilizada para remover frequências acima da faixa de frequências de interesse, e prevenir que não haja sobreposição espectral dos sinais amostrados. No projeto proposto, o filtro tem frequência de corte de 200Hz, e atenua sinais a uma taxa de 100dB/década.

Para implementação prática, foi escolhida a topologia Sallen-Key, contendo dois elementos reativos (capacitores) e dois resistores por amplificador operacional. Optou-se pela utilização do circuito integrado OPA2335, que contém dois amplificadores internos e, dessa forma, foi implementado um filtro passa-baixas de 4º ordem. Aproveitou-se a alta impedância de entrada do próximo estágio de processamento - o conversor A/D de precisão -, para implementar, nesse ponto, mais uma etapa passa-baixa de primeira ordem (passiva), totalizando, assim, um filtro passa-baixa de 5ª ordem.

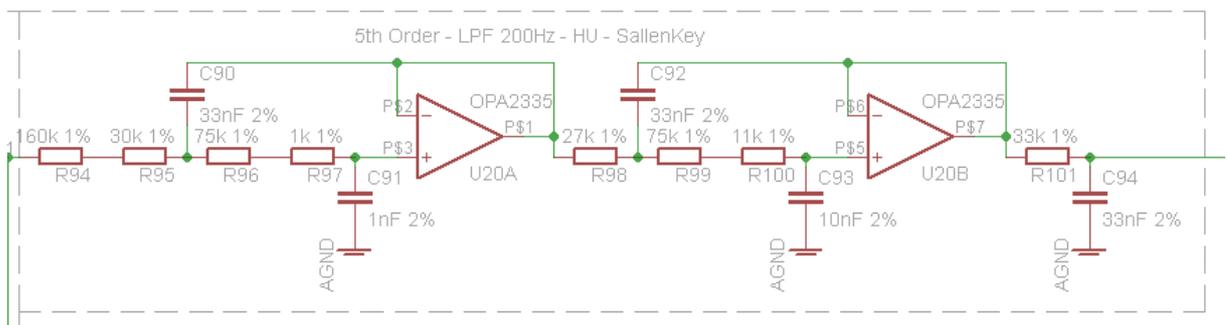


Figura 25: Circuito do filtro passa-baixa 5ª ordem

O projeto do filtro foi feito através do software “Aproximações” [11]. Utilizou-se a aproximação de Humphrerys (HU) devido à sua semelhança com o filtro passa-baixa ideal (brick wall). Como desvantagem, essa aproximação apresenta oscilações de ganho na banda de passagem que, no caso do projeto, foram escolhidas para serem inferiores a 0,5%. Outra desvantagem é a elevada alteração de fase perto da frequência de corte. Com os coeficientes definidos do polinômio aproximador HU, resolveu-se o sistema não-linear de equações, com o auxílio do MatLab, para definir os valores dos resistores e capacitores da implementação Sallen-Key. Com os valores definidos, fez-se uma nova iteração para verificar a resposta do filtro, utilizando-se, dessa vez, valores comerciais de resistores e capacitores, além de verificar a influência da tolerância, a tangente de perdas e a impedância de saída dos componentes na resposta do filtro.

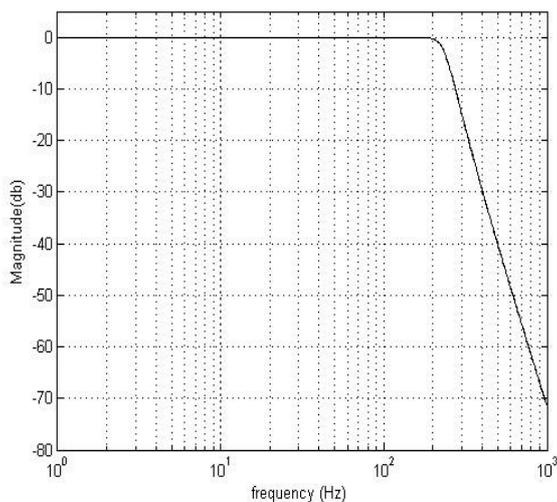


Figura 24: Resposta de ganho do filtro.

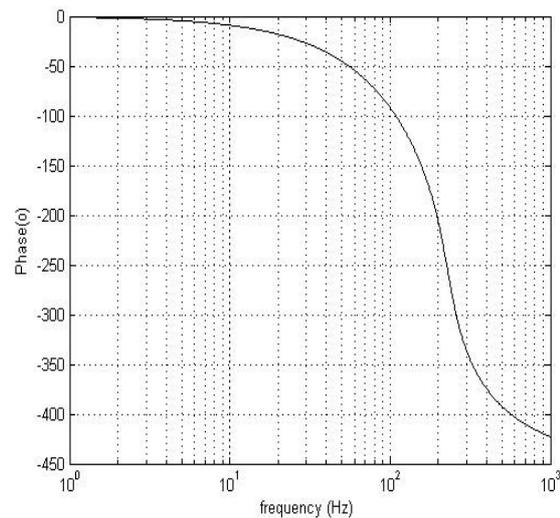


Figura 25: Resposta de fase do filtro.

2.5.4: Conversor ADC de precisão

Este conversor é responsável pela digitalização dos 4 sinais analógicos previamente amplificados e filtrados dos extensômetros. Utilizou-se o conversor ADS7871, que apresenta as seguintes vantagens:

- Amplificador interno de ganho programável (PGA) para cada canal: 1, 2, 4, 5, 8, 10, 16 e 20V/V;
- Resolução de 14bits;
- Entradas programáveis entre diferencial (4) ou simples (8) multiplexáveis;
- Referência internamente/externamente programável: 1,15V, 2,048V ou 2,5V;
- Existem 4 canais para extensômetros, porém o conversor AD possui 8 canais de entrada. Assim, os outros 4 canais são utilizados para:
 - Canal 4: Medição da tensão na fonte de alimentação de precisão(3,0625V);
 - Canal 5: Canal extra disponível com proteção ESD na entrada;
 - Canal 6: Canal extra disponível com proteção ESD na entrada;

- Canal 7: Canal extra disponível com proteção ESD na entrada.

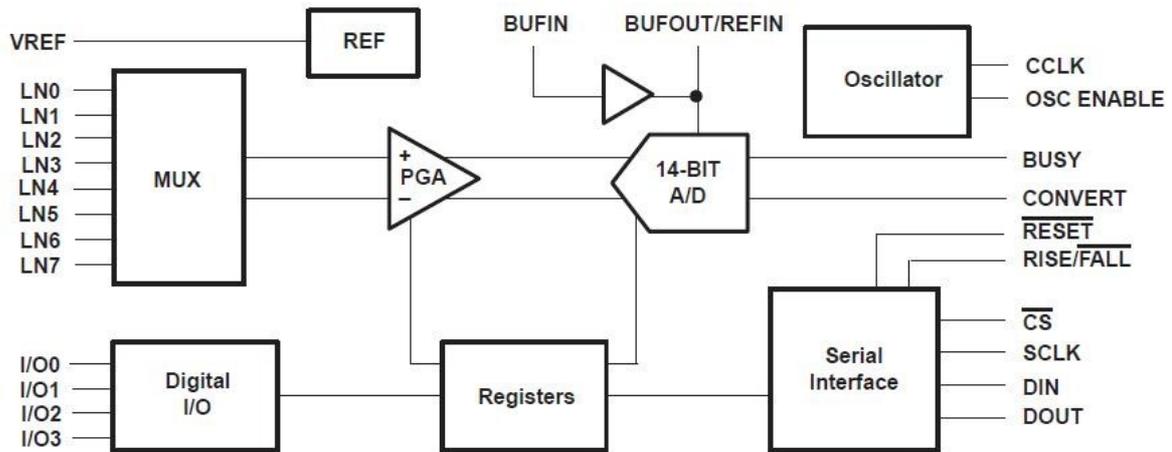


Figura 25: Diagrama interno do ADC de precisão [10].

O FPGA é responsável por selecionar o ganho referente a cada canal. A cada 0,0025s, ele efetua a amostragem de todos os canais. Entretanto, os sinais lidos são transmitidos somente a cada 0,01s, em virtude do buffer de transmissão serial RF não suportar uma taxa tão alta de atualização dos extensômetros/ADC de precisão.

A seleção do ganho de cada canal é feita através do computador (da estação base), que recebe os dados desse sistema de telemetria. O operador da estação base pode enviar comandos via radiofrequência para o sistema de instrumentação, selecionando o ganho de cada canal, assim como o ajuste de offset.

2.5.5: Fonte de alimentação de precisão

Para alimentar os extensômetros, é necessária uma fonte com reduzida oscilação em função da elevada sensibilidade à variações da fonte de alimentação. Para tanto, utilizou-se um regulador linear e filtros passa-baixas para reduzir o ruído na alimentação. A figura 26 mostra o circuito implementado. Os resistores são de 0,1% de precisão.

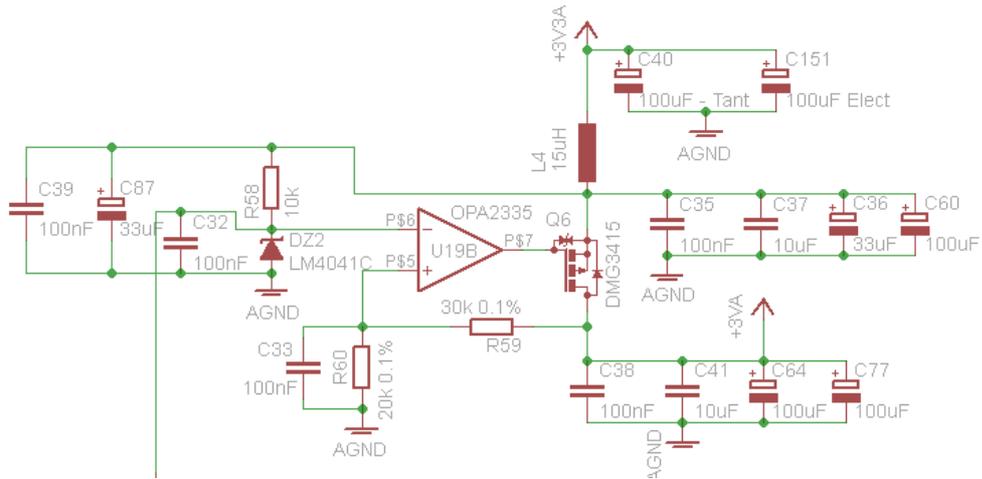


Figura 26: Circuito da fonte de precisão.

O circuito integrado OPA2335 é um amplificador operacional de precisão, com V_{os} típico de $1\mu V$, que fecha a malha de controle com o transistor de potência PMOS (DMG3415). O LM4041 é responsável por gerar a tensão de referência ($1,225V$) nesta malha de controle. O banco de capacitores no dreno e fonte de Q6, assim como o Indutor L4, funcionam como filtro de segunda ordem. Utilizou-se capacitores de tântalo, eletrolítico e cerâmico em paralelo para melhorar a resposta em frequência deste filtro. A tensão de saída da fonte é dada por:

$$V_{out} = V_{ref} \cdot \left(1 + \frac{R_{59}}{R_{60}}\right) = 1.225V \cdot \left(1 + \frac{30k\Omega}{20k\Omega}\right) = 3.0625V \quad (13)$$

2.6: Giroscópio

O giroscópio é o dispositivo que mede e mantém a sua orientação, baseando-se no princípio da conservação angular de movimento. Esse tipo de sensor é utilizado quando se deseja implementar um sistema de orientação preciso, independente da orientação momentânea do veículo.

Nesse trabalho, são utilizados 3 sensores, instalados próximos ao centro de gravidade do veículo. Cada sensor mede a velocidade de giro em uma componente do sistema cartesiano (X, Y e Z), que, através de integração, são utilizadas para determinar os ângulos de mergulho (*pitch*), rolagem (*roll*) e guinada (*yaw*).

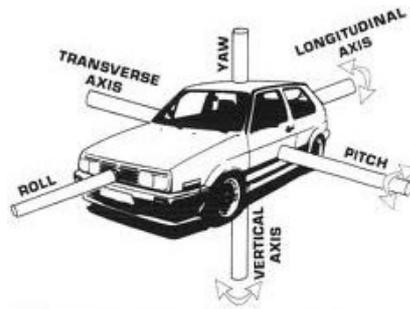


Figura 27: Eixos de rolagem

Cada sensor utilizado para medir essas componentes (LY530A), fornece a velocidade angular do seu respectivo eixo ao controlador de forma digital, via protocolo I2C. Como os 3 sensores utilizam o mesmo barramento, e por ser possível selecionar apenas dois endereços distintos, houve a necessidade de implementar um sistema de multiplexação do sinal de clock entre os sensores com mesmo endereço físico. Esse sensor apresenta as seguintes características:

- Tecnologia MEMS;
- Resolução de 10bits;
- Velocidade máxima de 300°/s;
- Filtro passa-baixa e passa-alta internamente programáveis;
- Frequência de leitura de 400Hz.

Apesar da frequência de atualização dos sensores ser de 400Hz (característica do sensor), os dados do giroscópio somente são enviados para o sistema de telemetria a cada 10Hz (taxa suficiente para representar o evento físico em questão).

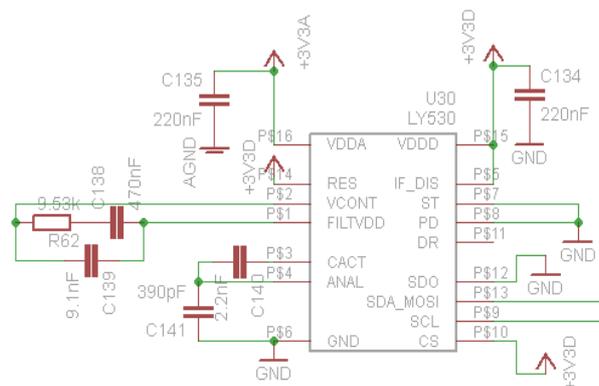


Figura 28: Circuito elétrico do giroscópio eixo X

2.6.1: Filtro passa-baixas e integração numérica

A filtragem passa-baixa digital e a integração numérica são utilizadas para remover componentes de alta frequência dos dados medidos e converter o sinal de velocidade angular para deslocamento angular, respectivamente.

O método de integral numérica utilizado foi a segunda regra ou 3/8 de Simpsons [24]. Nesse método, são utilizadas, obrigatoriamente, 4 amostras defasadas igualmente no tempo, as quais, para a integração, são aproximadas por um polinômio interpolador cúbico, conforme pode ser visto na figura 29.

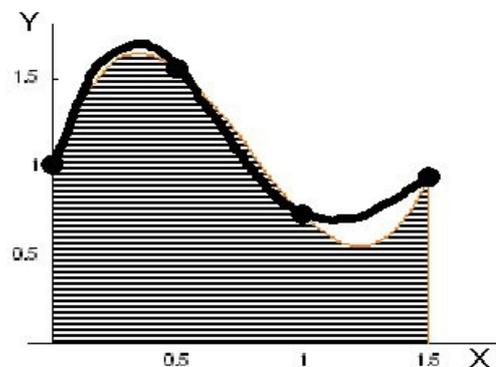


Figura 29: Integração numérica regra 3/8 Simpsons

O valor da integral é calculado:

$$\int_{x_0}^{x_3} f(x) dx = \frac{3 \cdot h}{8} [f(x_0) + 3 \cdot f(x_1) + 3 \cdot f(x_2) + f(x_3)] + E_{\text{erro}} \quad (14)$$

Onde:

h: Intervalo de integração ($x_1 = x_0 + 3 \cdot h$);

E_{erro} : Erro da integral ($-3/8 \cdot f'''(c) \cdot h^5$), onde c pertence ao intervalo (x_0, x_3).

Esse método numérico favorece a implementação digital, pois a única divisão necessária é múltipla de dois, o que possibilita trabalhar com variáveis de ponto fixo contendo 3 casas decimais, conseguindo assim, representar todos os resultados possíveis dessa integral. O método também possui menor erro, se comparado à primeira regra ou 1/3 de Simpsons ou ainda ao Trapezoidal.

2.7: Acelerômetro

O acelerômetro é um sensor que mede a sua variação de velocidade no tempo. Este tipo de dispositivo é utilizado para se conhecer as forças instantâneas impostas no veículo pela pista/motor.

Na implementação prática do projeto, desenvolveu-se o circuito de leitura e controle simultâneo de 3 acelerômetros, sendo que cada sensor utilizado mede a aceleração nos 3 componentes do sistema de coordenadas cartesianas (X, Y e Z). O primeiro desses sensores é fixado perto do centro de gravidade do veículo – juntamente com os giroscópios. Os outros dois podem ser instalados em qualquer lugar do veículo como: balança das suspensões, *cockpit*, motor, eixos de rolagem da suspensão dianteira e ou traseira e etc. Dessa maneira, consegue-se mensurar as forças impostas na suspensão, vibrações repassadas ao piloto, vibrações geradas pelo motor e verificar se o veículo está escorregando as rodas dianteiras e/ou traseiras em curvas.

Cada sensor utilizado (ADXL345) fornece a aceleração linear nos 3 eixos de forma digital, via protocolo SPI. Devido aos sensores estarem utilizando o mesmo barramento, optou-se por multiplexar o sinal de *chip-select* para economizar pinos de entrada e saída do FPGA. Esse acelerômetro apresenta as seguintes características [25]:

- Tecnologia MEMS;
- Resolução de 4mg;
- Aceleração máxima de $\pm 16g$;
- 13 bits de resolução;
- 3 eixos de medição (X, Y e Z);
- Frequência de leitura selecionável entre 200Hz, 400Hz, 800Hz e 1,6kHz.

Apesar da frequência de atualização dos sensores ser selecionável, os dados do acelerômetro somente são enviados para o sistema de telemetria a cada 200Hz. Assim, por padrão, definiu-se também a taxa de leitura dos acelerômetros em 200Hz.

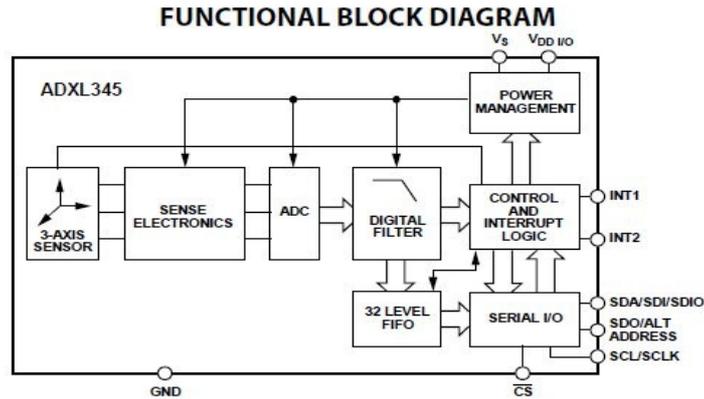


Figura 30: Diagrama interno do acelerômetro

2.8: Luzes de trânsito

O sistema de luzes de trânsito engloba o farol e a luz de freio/sinalização. Esse sistema deve fornecer ao condutor condições de trafegar durante períodos noturnos, assim como alertar outros condutores que o veículo está se movimentando e/ou freando. Para isso, utiliza-se, na parte frontal do veículo, dois faróis e, na parte traseira, uma luz de freio/sinalização – ambas compostas somente por leds.



Figura 31: Montagem farol: Lente de proteção, colimador, led e carcaça

O farol é composto por uma lente protetora, lente colimadora, led de potência e carcaça protetora. A utilização do colimador proporciona melhor aproveitamento espacial do feixe de luz emitido e, no caso do farol esquerdo, o feixe é direcionado à frente (ângulo de irradiação de 15°). O farol direito utiliza outro modelo de lente

colimadora, que direciona o feixe de luz para os lados (ângulo de irradiação de 38°). Dessa forma, consegue-se ter visão a longo alcance à frente e ao redor do veículo.

O led de potência, fonte luminosa dos faróis, foi escolhido devido a sua alta eficiência, ao elevado fluxo luminoso gerado, além de apresentar as seguintes características [17]:

- Geração de aproximadamente 80lm por watt consumido;
- Fluxo luminoso total de 1200lm/led;
- Corrente de operação de 1050mA;
- Tensão de funcionamento 12~14V_{cc};
- Temperatura de cor: 6000~7000K (branco quente);
- Ângulo de visão de 140°.

A carcaça protetora, na qual o led está termicamente fixado, foi projetada para contornar problemas referentes às altas temperaturas que os leds de potência atingem - causando redução da sua vida útil. Desenvolvida em alumínio, a carcaça está completamente exposta ao ambiente, aumentando, desse modo, a condução térmica entre o led e o meio ambiente. Adicionalmente, o farol foi instalado no topo do veículo, onde há intenso fluxo de ar, visando o maior resfriamento possível.

Para o controle da intensidade luminosa dos faróis e luz de freio, é utilizada a técnica de modulação PWM, na qual o ciclo ativo é definido internamente no FPGA. As chaves utilizadas no acionamento dessas cargas são do tipo MOS, e apresentam baixíssima resistência de condução [15] e [16] (aproximadamente 17mΩ). O farol é ligado via botão localizado no painel de instrumentação; e as luzes de freio/sinalização são ligadas nas seguintes condições:

- Se o veículo está com os faróis ligados, a luz de freio fica piscando à meia luz a cada 1s (luz de sinalização).
- Quando o freio é acionado, a luz permanece inteiramente acesa (luz de freio).

A luz de freio/sinalização possui internamente dois arrays independentes de leds. O primeiro engloba todos os leds (utilizado para luz de freio), e o segundo utiliza apenas alguns leds (utilizado para luz de sinalização).



Figura 32: Faróis montados e utilizados nos Bajas.

A modulação PWM proporciona, além do controle de luminosidade dos leds, redução do consumo de carga drenada das baterias. Desse modo, seleciona-se o ciclo ativo do PWM visando um compromisso ótimo entre fluxo luminoso gerado, com baixo consumo de energia da bateria do farol.

2.9: Baterias e carregadores

As baterias e carregadores formam um sistema completo de armazenamento e carregamento de energia na forma química. Têm como principal função servir de fonte energética para os circuitos, sensores e atuadores utilizados no projeto. Para tal, a bateria armazena a energia e o carregador é responsável por carregá-las, de forma controlada.

2.9.1: Baterias

A bateria é um dispositivo eletro-químico que armazena energia na forma química, e a torna disponível na forma elétrica. As mesmas podem ser constituídas por uma única célula galvânica, ou uma pilha delas, dependendo da sua capacidade e tensões terminais.

Nesse projeto, as baterias são as únicas fontes de energia elétrica dos sistemas de instrumentação, telemetria, painel, controlador, luzes e buzina. Por

questões de regra das competições Baja SAE, e interferência entre os sistemas, definiu-se utilizar diferentes baterias para cada grupo de cargas, conforme tabela 5.

Tabela 5: Baterias utilizadas.

	Tipo	Especificação	Massa (g)	Dimensões (mm)	Características	CARGAS	Custo (R\$)
Bateria luz de freio	Li-ION	10,8V @ 890mA.h	57	46 x 34 x 16	Bateria BL-5B celular Nokia, 3 baterias em série	Luz de freio	65,00
Bateria buzina	Li-ION	10,8V @ 2200mA.h	129	129 x 65 x 19	Pilhas UR18650A, 3 pilhas em série	Buzina	115,00
Bateria painel	Li-ION	7,2V @ 4400mA.h	172	172 x 65 x 19	Pilhas UR18650A, array de 2 pilhas em série com 2 em paralelo	Instrumentação, telemetria, painel e controlador	155,00
Bateria farol	Pb-ácido	12V @ 4500mA.h	1560	90 x 70 x 106	Bateria selada	Farol, luz de sinalização e backlight painel	45,00

Com a separação das baterias, consegue-se atingir elevada otimização, em razão das cargas e redução de massa. O sistema crítico (luz de freio), que deve estar sempre funcionando nas competições Baja SAE, foi dimensionado com elevada margem de segurança, e os sistemas menos críticos são otimizados ao máximo. A bateria do farol, que possui maior dimensão e massa, pode ser removida do veículo para competições diurnas, nas quais seu uso não é necessário, ajudando, dessa forma, a reduzir a massa total do veículo.

É possível perceber, pela tabela 4, as diferenças de capacidade de carga, tensão, massa, volume e custo das baterias utilizadas. Fica evidente a elevada densidade energética de 740kJ/kg versus 130kJ/kg das baterias de Li-ION e Pb-ácido, respectivamente; porém, a um custo financeiro cerca de cinco vezes maior.

2.9.2: Carregador baterias

O carregador é um dispositivo eletrônico utilizado para injetar energia na bateria, utilizando-se da passagem forçada de corrente pela mesma. Há inúmeras maneiras e modos de controlar a injeção de energia nas baterias; nesse trabalho, utilizou-se reguladores lineares controlados pela corrente, tensão e tempo de carga.

Os carregadores, quando alimentados via conector localizado no painel de instrumentação, desconectam as baterias de Li-ION das suas cargas e as conectam aos respectivos circuitos carregadores. Para que as cargas não sejam desligadas durante o processo, há um *by-pass* via diodo, que mantém as cargas sempre alimentadas com tensões de 9V (painel/aquisição/telemetria/controlador) e 12V (luz de freio e buzina), enquanto as baterias estiverem carregando. Utilizando-se deste chaveamento, é possível monitorar a corrente fornecida à carga, assim como a corrente de carga em cada bateria de Li-ION. Na bateria de Pb-ácido, não foi desenvolvido carregador embarcado, devido à facilidade de removê-la do veículo, e à pretensão de sua substituição por equivalente de Li-ION.

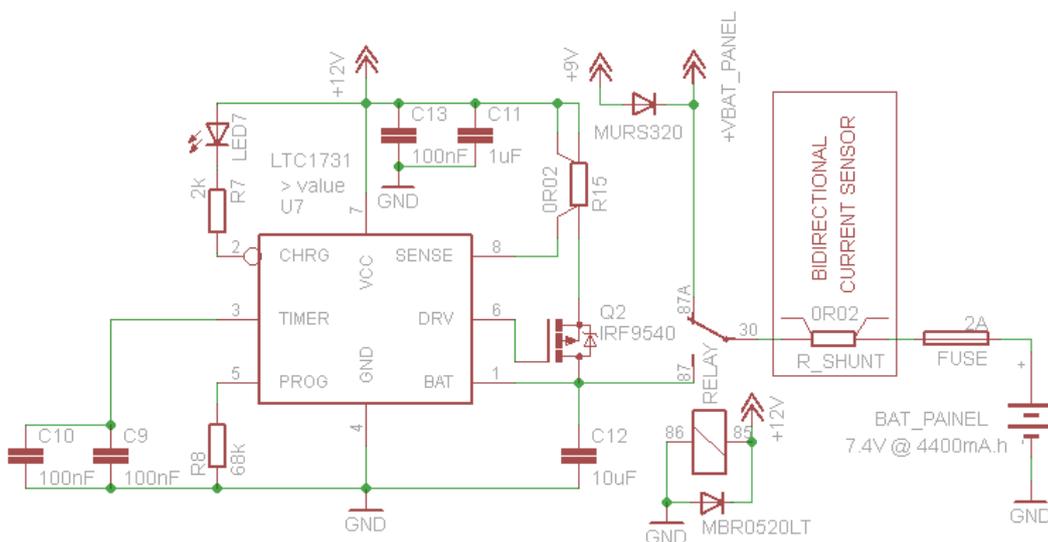


Figura 33: Circuito carregador bateria painel

O carregador das baterias da luz de freio e o da buzina, quando acionados, chaveiam também as 3 pilhas que formam a respectiva bateria, da configuração série, e conectam cada pilha paralelamente ao seu respectivo carregador, conforme figura a 34. Nesse caso, as pilhas formadoras da bateria são carregadas individualmente, ao contrário do que é feito na bateria do painel, onde o conjunto é carregado por inteiro (figura 33).

O circuito utilizado para carregar a bateria da buzina é similar ao da luz de freio, porém a corrente e tempo de carga são maiores.

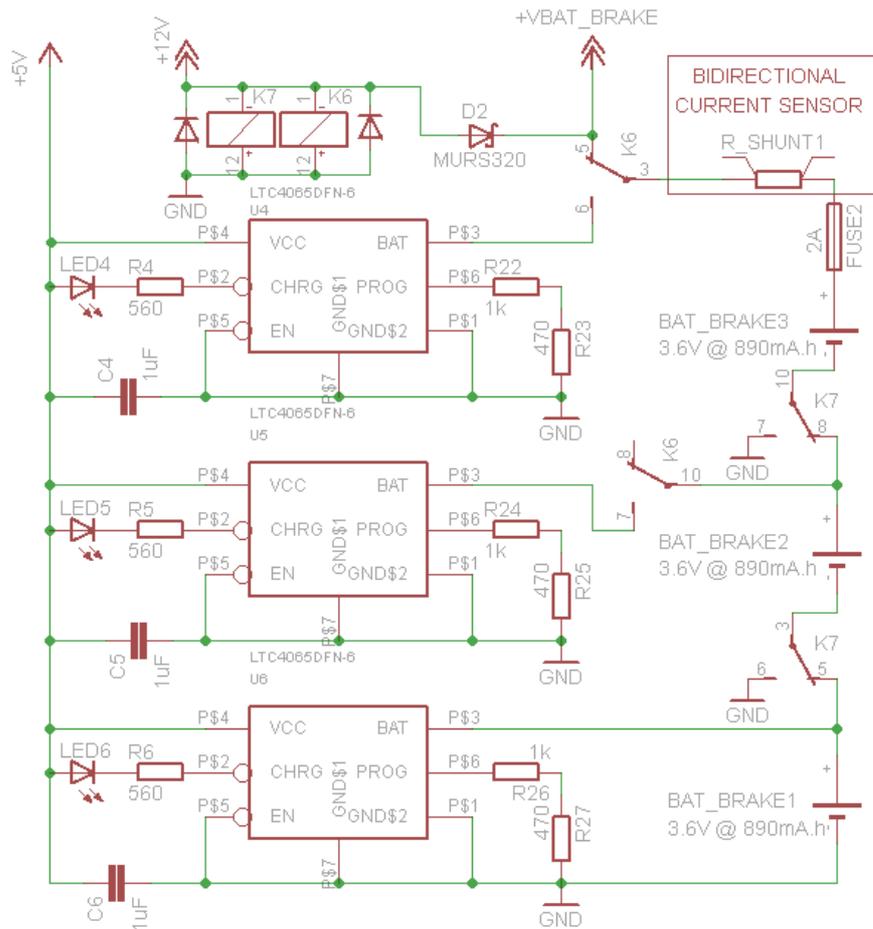


Figura 34: Carregador da bateria da luz de freio

Para alimentar os carregadores com as tensões requeridas (5V, 9V e 12V), utilizou-se uma fonte de computador pessoal modificada. Essa fonte fornece as seguintes tensões e correntes necessárias ao circuito de carga:

- 5V e corrente de 5A;
- 9V e corrente de 1A;
- 12V e corrente de 3A.

Houve a necessidade de instalar um regulador linear (LM7809) internamente na fonte, para gerar a tensão de 9V.

Para acionar o processo de carga, é necessário conectar a fonte de computador modificada na rede elétrica, e ligar o cabo que interliga a fonte modificada ao conector de carga, localizado na frente do painel de instrumentação. O circuito de carga detecta as tensões, comuta os relés, interligando as baterias aos

seus respectivos carregadores, e, então, o processo de injeção de corrente nas baterias é iniciado. O processo de carregamento deve durar no máximo cinco horas, e há 7 leds (um para cada carregador) que indicam se a bateria está carregando (led aceso), completamente carregada (led apagado), ou se está danificada (led piscando a cada 2s – apenas para as baterias de luz de freio e buzina).



Figura 35: Baterias e placa contendo carregadores

2.10: Fontes de alimentação

As fontes de alimentação são circuitos eletrônicos que regulam a tensão de alimentação proveniente das baterias para níveis aceitos e estáveis pelos componentes eletrônicos. Nesse trabalho, desenvolveu-se 5 fontes diferentes: duas fontes são chaveadas, e alimentam os circuitos digitais de 5V e 3,3V respectivamente; a terceira é um regulador linear de 3,3V para alimentar os circuitos analógicos e sensores; e a quarta e quinta fonte - estas lineares e de precisão -, são de uso exclusivo da extensometria e do GPS, e foram previamente detalhadas nas referidas seções.

2.10.1: Fontes chaveadas

Uma fonte chaveada é uma unidade de fonte de alimentação eletrônica que incorpora um regulador chaveado, ou seja, um circuito controlador que chaveia a corrente, ligando e desligando rapidamente, de forma a manter a tensão de saída estabilizada. Reguladores chaveados são utilizados quando se deseja uma

eficiência maior, tamanho reduzido e baixo peso, entretanto, o chaveamento é mais complexo e caro, como também pode causar problemas de ruído na saída.

Na alimentação dos circuitos digitais, que são menos suscetíveis ao ruído, utiliza-se fontes chaveadas (LT3695 e LTC1474) para gerar as tensões de 5V e 3,3V, respectivamente. Essas fontes são alimentadas diretamente da tensão da bateria do sistema de instrumentação/telemetria/painel, e possuem as seguintes características [18] [19]:

- Eficiência mínima de 85% no ponto de operação;
- Corrente máxima de 300mA – fonte de 3,3V (alimentação dos circuitos integrados digitais);
- Corrente máxima de 1000mA – fonte de 5V (alimentação do transceptor, leds do painel e encoders);
- Podem ser ligadas/desligadas via FPGA.

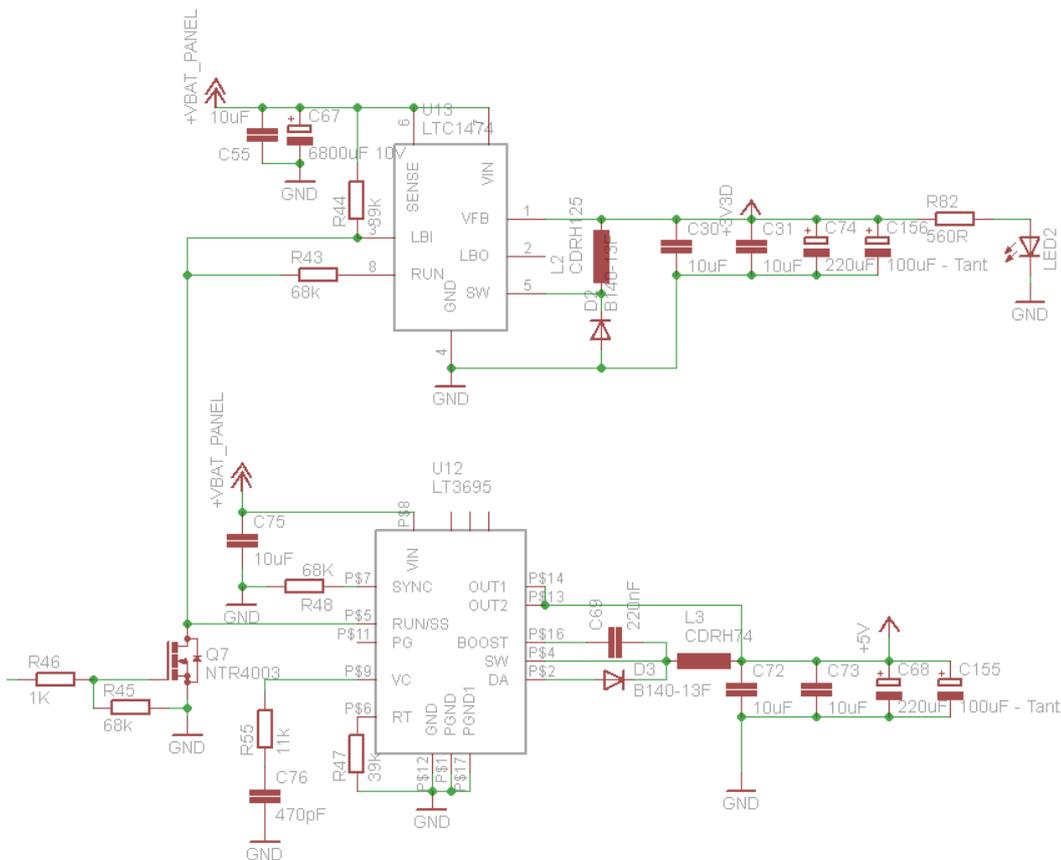


Figura 36: Fonte chaveada de 3,3V e 5V utilizadas

Para reduzir o ruído de saída devido ao chaveamento da corrente, utilizou-se um banco de capacitores cerâmicos e de tântalo para remover as componentes de ruído de alta frequência, e um eletrolítico de maior valor para as componentes de baixa frequência. Os indutores utilizados são blindados, e as trilhas da placa de circuito impresso foram projetadas para serem as mais curtas possíveis, a fim de reduzir a emissão de ondas eletromagnéticas oriundas do chaveamento da corrente.

2.10.2: Fonte linear

Uma fonte linear é um regulador de tensão baseado em um dispositivo ativo que opera em sua região linear [14] (em contraste com as fontes chaveadas), ou em dispositivos passivos, como em diodos zener operados em suas regiões de ruptura reversa. O dispositivo de regulação é feito para agir como um resistor variável, ajustando continuamente uma rede divisora de tensão para manter uma voltagem de saída constante. É muito ineficiente energeticamente se comparada à fonte chaveada, uma vez que dissipa o excesso de tensão em forma de calor, porém apresenta vantagens como baixo custo, simplicidade e baixo ruído de saída.

Na alimentação dos sensores e da parte analógica, que exigem uma fonte regulada contendo baixa quantidade de ruído, é utilizado um regulador linear (LM1117-3.3V). Este apresenta baixo *dropout* e é alimentado pela saída do regulador chaveável de 5V. Sua eficiência pode ser avaliada da seguinte forma:

$$Eff (\%) = \left(\frac{V_{out}}{V_{in}} \right) \cdot 100 = \frac{3,3}{5} \cdot 100 = 66 \% \quad (15)$$

Caso este regulador fosse alimentado diretamente da tensão de entrada ($6,5V \leq V_{IN} \leq 15V$), a eficiência variaria de 50% a 22% respectivamente. No entanto, utilizando-se a fonte chaveada para alimentá-lo, houve necessidade de elevação da qualidade e dos valores dos capacitores para filtrar os ruídos de alta frequência oriundos do chaveamento. Assim, capacitores de tântalo e cerâmicos foram conectados aos seus pinos de entrada.

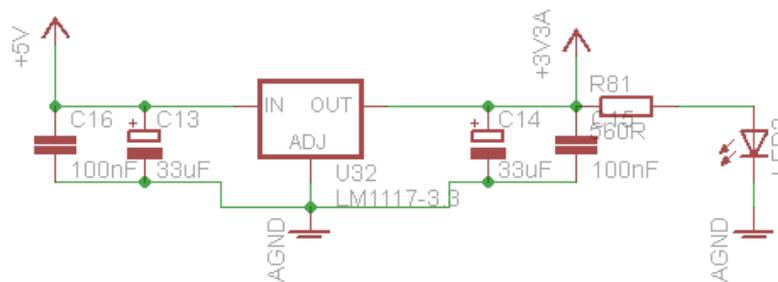


Figura 37: Esquemático fonte linear utilizada

Utilizou-se no layout da placa de circuito impresso, para redução de interferência e ruído entre os sistemas [4], a divisão física e dos planos de GND entre os sistemas que funcionam com tensões analógicas, sistemas digitais e dos sistemas de radiofrequência (GPS). Os sistemas de GPS, sensores analógicos e extensômetros (suscetíveis a EMI) foram alocados na PCB o mais distante das fontes chaveadas, e há somente um único ponto onde os diferentes GNDs se encontram [27]. Na parte de proteção na alimentação, utilizou-se transistor PMOS de resistência de condução inferior a $10\text{m}\Omega$ em série com a alimentação, para evitar que tensões negativas e inversão de polaridade queimassem os componentes dos sistemas de instrumentação, telemetria e painel. O layout da placa de circuito impresso desse sistema de instrumentação pode ser visto no apêndice C.

Capítulo 3: Telemetria

A telemetria é uma tecnologia que permite a medição e comunicação de informações de interesse entre dois pontos distintos. No projeto, o sistema de instrumentação fornece os dados dos sensores listados previamente, e a telemetria os transmite via radiofrequência para computador remoto na estação base. Para tal, o sistema de telemetria conta com o buffer serial e os transceptores de dados.

3.1.1: Buffer serial

O buffer serial é responsável por agrupar os dados dos sensores e enviá-los ao transceptor. Para isso, o buffer serial é constituído por 4 sub-buffers distintos, referenciados pela sua taxa de atualização (buffer 200Hz, 100Hz, 50Hz e 10Hz). Cada um dos sub-buffers armazena e transmite os dados dos sensores com mesma taxa de atualização do sub-buffer respectivo, conforme a tabela 6.

Tabela 5: Informações dos sub-buffers.

Taxa de Atualização(Hz)	Sensor	Eixos/Canais	Data Bits	Total	Total bits Buffer	Total Bytes Buffer	Total bits/s	Total Bytes/s	Ocupação Relativa do Canal(%)	
200	Acelerômetro 0	3	16	48	96	12	19200	2400	33.61	
	Acelerômetro 1	3	16	48						
100	Estensômetro/ADC precisão	8	16	128	144	18	14400	1800	25.21	
	Extra	2	8	16						
50	Inicializacao	8	8	64	336	42	16800	2100	29.41	
	Velocidade	6	12	72						
	Encoder Suspensao	4	10	40						
	Encoder Direção	1	8	8						
	ADC_tensao	7	10	70						
	ADC_corrente	3	10	30						
	ADC_posicao	2	10	20						
	Digital I/O	1	16	16						
	Nivel Gasolina	1	8	8						
	Extra	1	8	8						
10	Giroscopio	3	16	48	672	84	6720	840	11.76	
	Magnetometro	3	16	48						
	Temperatura PCB	1	8	8						
	Temperatura NTC	4	10	40						
	GPS_inicializacao	3	8	24						
	GPS_data	6	8	48						
	GPS_hora	7	8	56						
	GPS_latitude	12	8	96						
	GPS_longitude	12	8	96						
	GPS_altitude	5	8	40						
	GPS_status	4	8	32						
	GPS_velocidade	7	8	56						
	GPS_direção	7	8	56						
	GPS_end	3	8	24						
	TOTAL(Excluindo Start/Stop Bit)									57120
TOTAL(Incluindo Start/Stop Bit)							71400			
BaudRate Transceptor(bps)							115200			
Ocupação Canal(%)							61.98			

Depois de armazenados os dados nos sub-buffers, os mesmos são agrupados em pacotes conforme a tabela 7, e enviados para o transceptor a cada 10ms. Por questões de velocidade de comunicação, o pacote referente aos dados dos *buffers* de 200Hz, 100Hz e 10Hz (pacote enviado aos 15ms) iria levar mais de 10ms para ser enviado por completo, caso o *buffer* de 10Hz fosse transmitido por completo, ocasionando assim, atraso no envio do próximo pacote. Dessa forma, o pacote de 10Hz é enviado em dois pacotes distintos de 42bytes (inferior e superior, enviados aos 15ms e 35ms, respectivamente).

Tabela 7: Sequência de envio dos sub-buffers.

TEMPO	0ms	5ms	10ms	15ms	20ms	25ms	30ms	35ms	40ms	45ms
Buffer(Hz)										
200	12Bytes	12Bytes	12Bytes	12Bytes	12Bytes	12Bytes	12Bytes	12Bytes	12Bytes	12Bytes
100		18Bytes		18Bytes		18Bytes		18Bytes		18Bytes
50		42Bytes				42Bytes				42Bytes
10				42Bytes(Inferior)				42Bytes(Superior)		
TOTAL ENVIADO		84Bytes		84Bytes		84Bytes		84Bytes		84Bytes
	ARMAZENA	ENVIA	ARMAZENA	ENVIA	ARMAZENA	ENVIA	ARMAZENA	ENVIA	ARMAZENA	ENVIA

TEMPO	50ms	55ms	60ms	65ms	70ms	75ms	80ms	85ms	90ms	95ms
Buffer(Hz)										
200	12Bytes	12Bytes								
100		18Bytes								
50				42Bytes				42Bytes		
10										
TOTAL ENVIADO		42Bytes		84Bytes		42Bytes		84Bytes		42Bytes
	ARMAZENA	ENVIA								

A sequência de envio dos pacotes do buffer serial volta a se repetir completamente a cada 100ms, onde cada novo pacote transmitido contém dados atualizados dos sensores.

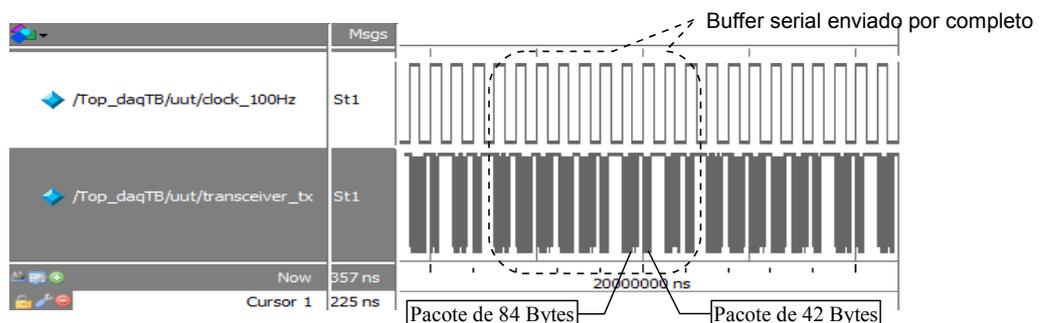


Figura 38: Buffer serial sendo enviado ao transceptor.

Pela figura 38, pode-se perceber que na borda de subida do sinal clock_100Hz (10ms), um novo pacote de dados é enviado ao transceptor (sinal

transceiver_tx). Os pacotes mais largos correspondem a 84bytes sendo enviados, e os menores, de 42bytes. Essa sequência de pacotes é comandada pela tabela 7 e se repete a cada 100ms. O código de controle do buffer serial, em verilog, pode ser visualizado no apêndice B.

3.1.2: Transceptor de dados

O transceptor (XT-09) é responsável pela comunicação de dados bidirecional entre o veículo e o computador na estação base, via radiofrequência. Esse transceptor possui as seguintes características [12]:

- Potência de transmissão selecionável 1mW, 10mW, 100mW, 500mW ou 1W;
- Comunicação Half duplex;
- Velocidade máxima de comunicação 115200bps;
- Alcance de até 64km com antena de alto ganho;
- Sensibilidade de recepção -100dBm (@115200bps);
- Protocolo de comunicação serial assíncrona;
- Três camadas distintas de endereçamento;
- Encriptação de 256bits AES (*Advanced Encryption Standard*).

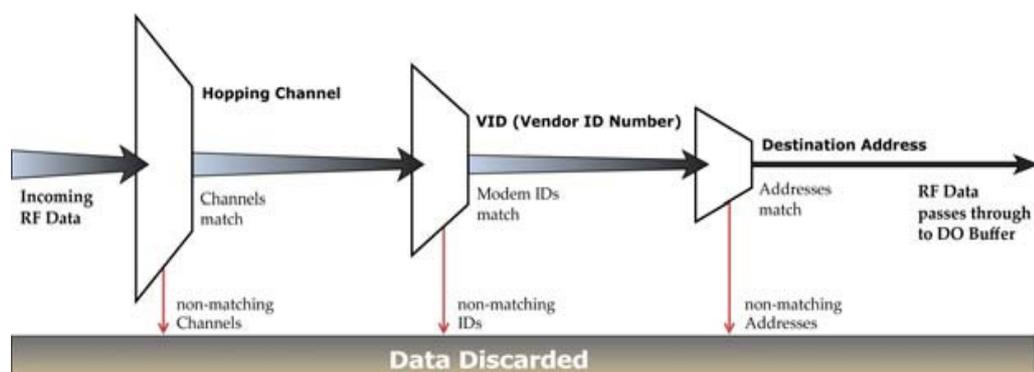


Figura 39: Endereçamento do receptor.

Na comunicação bidirecional, o veículo estará continuamente enviando para a estação base os dados de todos os sensores (estando a telemetria ligada). A estação base, porém, também pode eventualmente enviar comandos e alterar configurações do veículo em tempo real. Portanto, na maior parte do tempo, é o veículo quem está transmitindo dados. Os dados transmitidos do veículo (CH1) e recebidos na estação base (CH2) podem ser vistos na figura 40. Nota-se que os transceptores *bufferizam* internamente os pacotes em grupos maiores para transmissão/recepção – assim, a temporização de um novo pacote recebido a cada 10ms é perdida, porém a sequência e ordem dos mesmos são mantidas. Nota-se também um atraso de cerca de 20ms entre o sinal que entra no transmissor e o sinal que sai do receptor. É possível, também, fazer uma aproximação gráfica no CH2 sobre a sua utilização, e percebe-se que a ocupação do canal RF é de cerca de 65%, confirmando os cálculos da tabela 6.

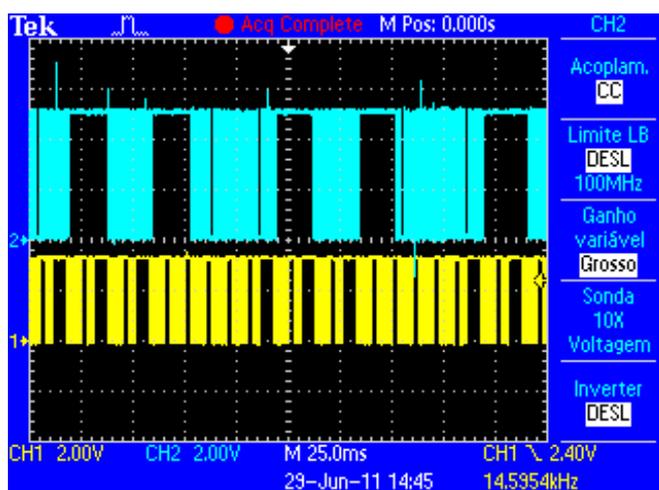


Figura 40: Dados transmitidos e recebidos via RF

3.1.2.1: Transceptor veículo

Este transceptor efetua a comunicação radiofrequência - FPGA, recebendo os dados provenientes do buffer serial e transmitindo-os via RF ao transceptor localizado na estação base. Utiliza-se o padrão RS-232 na comunicação FPGA – transceptor, a fim de garantir maior imunidade ao ruído nos sinais de dados transmitidos e recebidos.



Figura 41: Transceptor do veículo em operação

O transceptor é o dispositivo que mais consome energia do sistema (650mA @ 5V). Assim, para situações em que se deseja apenas andar com o veículo sem o uso da telemetria, o piloto desliga o transceptor, e apenas o painel de informações mantém-se ligado, economizando carga da bateria e prolongando o tempo de uso do sistema em aproximadamente 400%.

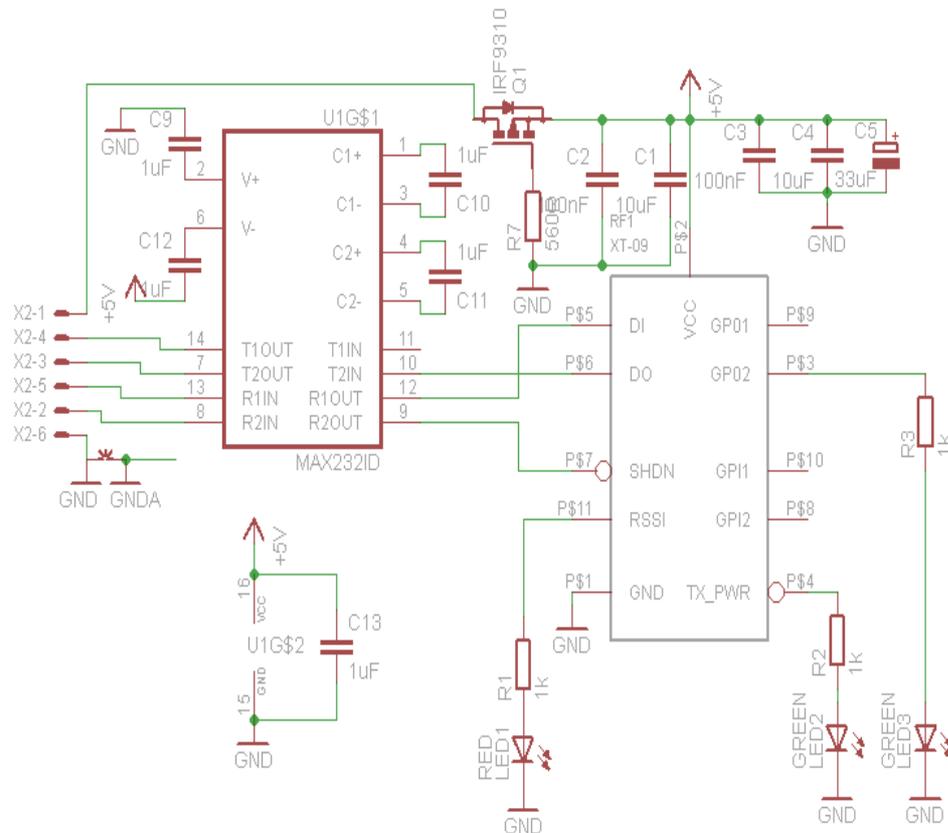


Figura 42: Esquemático transceptor veículo

3.1.2.2: Transceptor estação base

Este transceptor faz a comunicação radiofrequência – computador na estação base. O transceptor utiliza o padrão serial assíncrono como porta de comunicação, embora esse tipo de porta não seja mais utilizada nos computadores. Desse modo, desenvolveu-se um conversor serial-USB para que os dados recebidos/transmitidos possam ser processados em qualquer computador. A alimentação do conversor/transceptor é fornecida pela própria porta USB, e o sistema, quando ligado no computador, fica em modo *sleep*; somente quando a porta USB é identificada e a referida porta serial virtual é aberta, o transceptor é habilitado para transmitir/receber dados. O esquemático pode ser visualizado na figura 43.

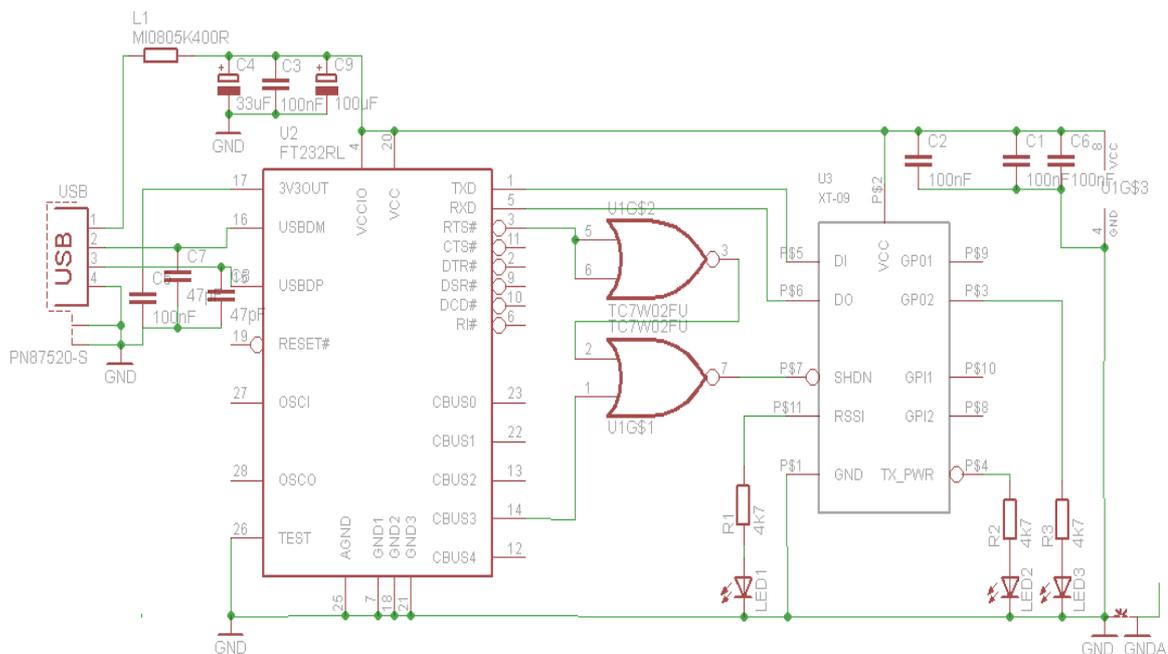


Figura 43: Esquemático transceptor PC

Para proteger os transceptores contra sujeira/lama/água ao qual o veículo está sujeito, os transceptores foram alocados dentro de caixas plásticas hermeticamente seladas. O modelo PB-080 da Patola foi utilizado para tal fim.



Figura 44: transceptor PC montado e funcionando

Há ainda 3 leds indicativos do status dos transceptores. O primeiro indica quando o mesmo está recebendo dados (*RX*); o segundo mantém-se ligado quando o transceptor está ligado e habilitado, e se apaga quando o mesmo está transmitindo dados (*PWR/TX*); e o terceiro tem a sua intensidade luminosa proporcional à intensidade do sinal recebido (*RSSI*).

Capítulo 4: Painel de informações

O painel de informações é a interface existente entre o piloto e os dados do veículo. Nele estão inclusos mostradores de velocidade, rotação, marcha, nível de combustível, luzes de alarme, além de sistema de iluminação de fundo.



Figura 45: Painel de informações ao piloto.

O painel também possui um conjunto de três chaves e conector de carga que interage com o sistema de telemetria, instrumentação, painel, controlador, baterias e motor. A primeira chave, do tipo codificada, quando removida, desabilita por completo o veículo e a eletrônica de funcionarem – agindo desse modo como sistema anti-furto. A segunda e terceira chaves são para ativar o sistema de telemetria e ligar farol/luz de sinalização/*backlight*, respectivamente. E o conector é utilizado para carregar as baterias de Li-ION.

4.1: Mostradores

Os mostradores têm a função de servir como meio de comunicação entre os dados coletados e o piloto. Para isso, utilizam-se mostradores com ponteiros analógicos para a velocidade e rotação, por questão de facilidade de visão periférica do piloto. O mostrador de marcha, localizado junto ao mostrador de velocidade, utiliza display de led de 7 segmentos. O mostrador de gasolina, alocado junto ao mostrador de rotação, é do tipo display de barra de leds com 6 níveis distintos

(figura 45). As luzes de alarme, 3 no total, sinalizam para o piloto nível baixo das baterias, ocorrência de sobretemperatura e habilitação do sistema de telemetria.

Para uma melhor visualização do nível de gasolina, utilizam-se algoritmos de filtragem passa-baixa e histerese digital para remover oscilações indesejadas. Para evitar que, durante a troca de marchas, valores incorretos sejam apresentados ao piloto, é utilizado um sensor de posição do tipo *Make-Before-Break*, onde, na comutação, a chave fecha um novo contato antes de abrir o contato antigo. Assim, nunca haverá posição onde a chave está com seu contato em aberto. Os ponteiros analógicos, que estão diretamente conectados ao eixo do motor de passo (X25.168), são controlados via driver específico (MCZ33970). Este driver possui rampa de aceleração e desaceleração para a movimentação do motor de passo, proporcionando aos ponteiros, desse modo, movimentos suaves de deslocamento.

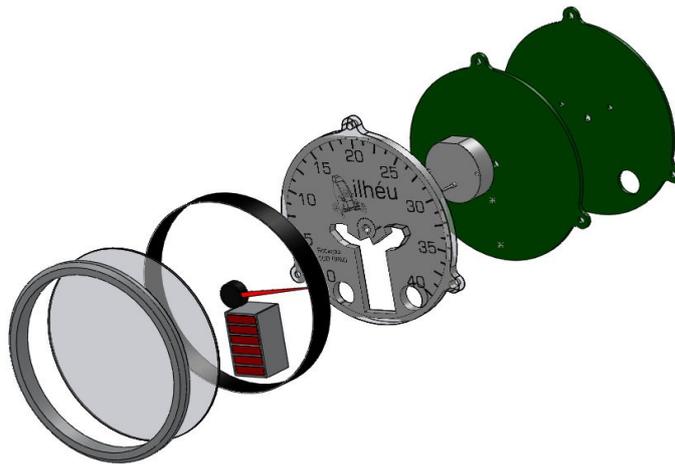


Figura 46: Conjunto de placas, guias de luz e proteção do mostrador de rotação e nível de gasolina.

4.2: Backlight

Os mostradores de velocidade e rotação possuem também luz de *backlight*. O efeito de *backlight* é formado por uma matriz de leds de alto brilho, guia de luz e filme refletor. A quantidade de leds (LSA676) do array foi definida para que se tenha um brilho de aproximadamente 200cd/m^2 [5]. Para isso, realizaram-se cálculos relativos à área luminosa do guia de luz:

$$\text{Área}_{util} = (\pi \cdot R^2) \cdot \frac{\text{Área}_{iluminada}}{\text{Área}_{total}} = (\pi \cdot 0,047^2) \cdot \left(\frac{270^\circ}{360^\circ}\right) = 0,0052 \text{ m}^2 \quad (16)$$

$$Iv_{array} = \text{Brilho} \cdot \text{Área}_{util} = 200 \cdot 0,0052 = 1040 \text{ mcd} \quad (17)$$

$$Q_{leds} = \frac{Iv_{array}}{Iv_{led}} = \frac{1040}{200} = 5,2 \text{ leds} \quad (18)$$

Por questões de arredondamento e simetria da placa de circuito impresso (PCB – printed circuit board), decidiu-se utilizar 6 leds por *array*. Foi utilizado um sétimo led para iluminar somente o ponteiro indicador de velocidade/rotação. A técnica de iluminação via lateral do guia de luz (*sideled*) [7] permitiu que fosse utilizado um pequeno número de leds. A extração da luz de dentro do guia é realizada através de ranhuras localizadas em sua parte inferior. Para aumentar a eficiência do sistema óptico, embaixo do guia de luz é utilizado um filme refletor, que proporciona um acréscimo de 32~50% de eficiência óptica [6].

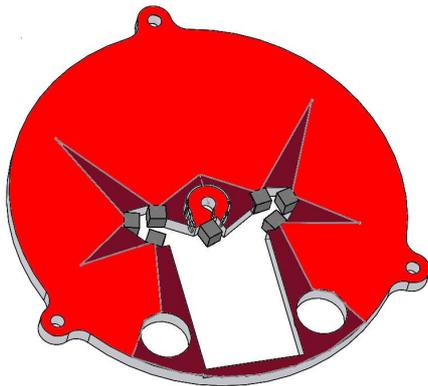


Figura 47: Projeto do guia de luz e posição dos leds.



Figura 48: Guia de luz, leds e filme refletor funcionando.

Na figura 48 pode-se visualizar os sete pontos de iluminação do guia de luz na parte central da placa, assim como o incremento de brilho devido ao filme refletor (área tracejada).

Para o acionamento do array de leds de backlight, é utilizada a modulação PWM de acordo com a tensão na bateria do farol. Com essa técnica, consegue-se manter o brilho constante do guia de luz, mesmo que a tensão na bateria oscile entre os valores $6,5V \leq V_{bat} \leq 14,5V$. A seguinte equação (baseada na curva ciclo

ativo versus corrente máxima dos leds) [13] foi utilizada para calcular a duração do ciclo ativo do PWM, de acordo com a tensão lida pelo ADC da bateria do farol:

$$Duty_{cycle} = -\frac{29}{128} \cdot Vbat_{farol} + 225 \quad (19)$$

Onde:

$Duty_{cycle}$: ciclo ativo do PWM (variável de 8bits);

$Vbat_{farol}$: tensão da bateria do farol lida no ADC (variável de 10bits).

As figuras 49 e 50 ilustram a modulação PWM enviada ao *backlight*, onde o canal 1 refere-se ao sinal de PWM, e o canal 2 à tensão na bateria. Percebe-se que, conforme a tensão na bateria diminui, o ciclo ativo aumenta, de acordo com a equação 19.

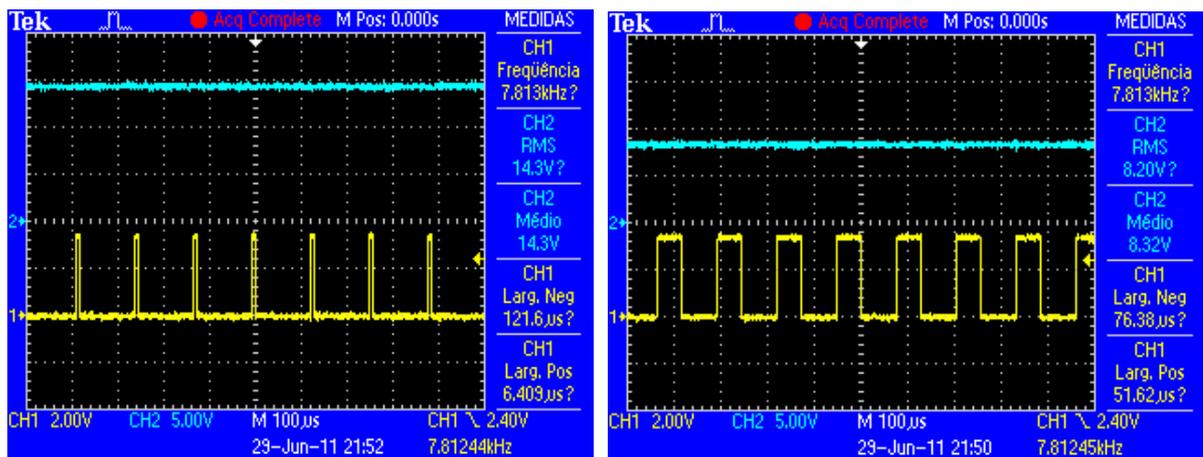


Figura 49: Sinal PWM com $Vbat = 14,3V$. Figura 50: Sinal PWM com $Vbat = 8,2V$.

Na parte de proteção, o circuito eletrônico do painel possui, em todas as entradas de alimentação, transistores PMOS (de baixo RDS_{on}) em série, para prevenir problemas relacionados à inversão de polaridades e tensões negativas. Os sinais de dados também possuem proteção contra ESD e resistores de amortecimento das oscilações/*overshoot* nos sinais digitais, garantindo assim, a integridade dos sinais de comunicação. O circuito completo do painel, contendo os drivers dos motores de passo, displays e leds, pode ser visualizado no apêndice D.

Capítulo 5: Sistema de controle

O sistema controlador tem como objetivo gerenciar as informações de entrada e saída dos sistemas listados previamente. Os dados obtidos através do sistema de instrumentação são processados, apresentados ao piloto através do sistema do painel de visualização, e enviados à equipe pelo sistema de telemetria. As informações obtidas servem de auxílio ao piloto e à equipe para a tomada de decisão.

A plataforma escolhida para o desenvolvimento do controlador foi o FPGA Spartan3E – 1200 da Xilinx. A utilização do FPGA deve-se ao fato da necessidade de se efetuar o processamento paralelo, e da possibilidade de definição e otimização em hardware dos periféricos, permitindo a utilização de um sistema dedicado, e com facilidade de expansão de suas potencialidades e baixo peso.

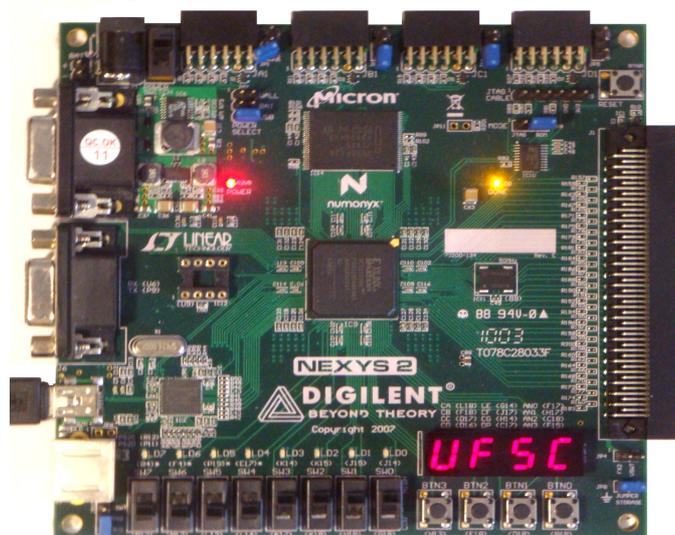


Figura 51: Kit de desenvolvimento NexysII.

O kit de desenvolvimento NexysII da Digilent foi utilizado na execução do sistema no FPGA. Nele, os códigos desenvolvidos são executados na frequência de 50MHz e se comunicam com o sistema de instrumentação, telemetria e painel através de um barramento de 56bits. Para a programação, utilizou-se a linguagem

de descrição de hardware Verilog HDL. Para tal, fez-se o uso dos seguintes softwares e ferramentas:

- Xilinx ISE – Desenvolvimento do código e compilação;
- ModelSIM – Simulação do código;
- Adept – Gravação código no FPGA;
- Spartan3E e NexysII – Teste em hardware.

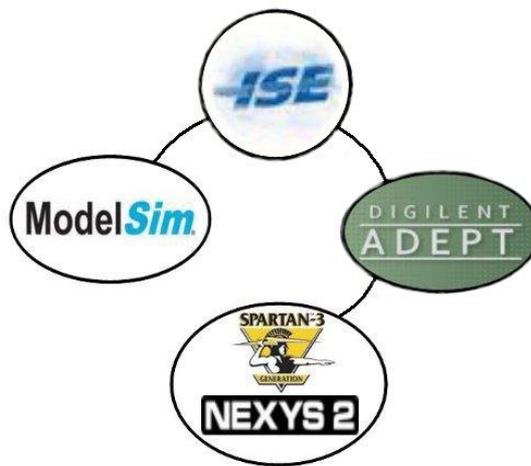


Figura 52: Fluxo de projeto.

Nesta aplicação, não foi utilizado nenhum softprocessor¹ ou código de terceiros para controle e comunicação. Dessa forma, conseguiu-se atingir elevado nível de otimização ao custo de grande desenvolvimento de códigos. A árvore do projeto, contendo todos os códigos desenvolvidos, é apresentada a seguir:

- TOP_DAQ.v: Arquivo TOP e controle dos Transceptores e portas serial;
 - UART_NexysII.v: Módulo UART da placa NexysII;
 - UART_transceiver.v: Módulo UART do transceptor;
 - Clock_control.v: Divisor de clock;
 - Adc_control.v: Controla os conversores ADC;
 - SPI_adc.v: Comunicação SPI do ADC;
 - Display_control.v: Controla os displays de led e luzes de alarme do painel;
 - display_serial.v: Comunicação serial do display;
 - Light_control.v: Controla as luzes do farol, backlight e freio;
 - PWM_module.v: Módulo gerador de PWM;
 - Gauge_control.v: Controla os ponteiros de velocidade/rotação;
 - spi_gauge.v: Comunicação SPI dos ponteiros;

¹ Processador implementado utilizando-se somente lógica programável.

- Timer_control.v: Controla os Timers e calcula a velocidade;
 - Timer_module.v: Contador de tempo de 24bits;
 - Div_control.v: Controla o divisor de 24bits;
 - Div24_unsigned.v: Divisor de 24bits de números naturais positivos;
- Digitalinput_control.v: Controla e efetua leitura dos expansores de I/O;
 - I2C_expand.v: Comunicação I2C dos expansores de I/O;
- Temp_control.v: Controla e efetua leitura do sensor de temperatura da PCB;
 - I2C_temperature.v: Comunicação I2C do sensor de temperatura da PCB;
- Gyro_control.v: Controla e efetua leitura dos giroscópios;
 - I2C_gyroscope.v: Comunicação I2C com os giroscópios;
- Gyro_lpf_integral.v: Filtra e integra o sinal dos giroscópios;
- Encoder_control.v: Converte para valor absoluto a posição dos encoders;
- Acce_control.v: Controla e efetua leitura dos acelerômetros;
 - SPI_acce.v: Comunicação SPI com os acelerômetros;
- ADC_straingage_control.v: Controla e efetua leitura dos Strain Gage e ADC de precisão;
 - SPI_adc_sg.v: Comunicação SPI com o conversor ADC de precisão;
- GPS_control.v: Controla e efetua leitura das informações desejadas dos pacotes NMEA;
 - uart_gps.v: Módulo UART do GPS;
- ports_daq.ucf: Arquivo contendo os constrains/pinos utilizados.

Para cada código citado na árvore de projeto, foi desenvolvido um outro código de teste (testbench) para validar virtualmente a funcionalidade esperada, através de simulação no software ModelSIM. Utilizando as simulações, conseguiu-se reduzir o tempo de desenvolvimento do sistema, além de otimizar/verificar erros de funcionamento das máquinas de estado. Devido a requisitos de espaço, nenhum dos 28 códigos e 28 *testbenchs* desenvolvidos serão mostrados nesta monografia.

Capítulo 6: Resultados globais

Sabe-se que o objetivo do sistema é servir de ferramenta de otimização do veículo, estando este submetido a diferentes condições de teste, além de mensurar as informações de funcionamento do automóvel. Para validar a proposta apresentada, foram feitas simulações computacionais com o software ModelSIM e testes práticos com o sistema no todo. Analisando os resultados, foi possível comprovar a funcionalidade dos sistemas propostos.

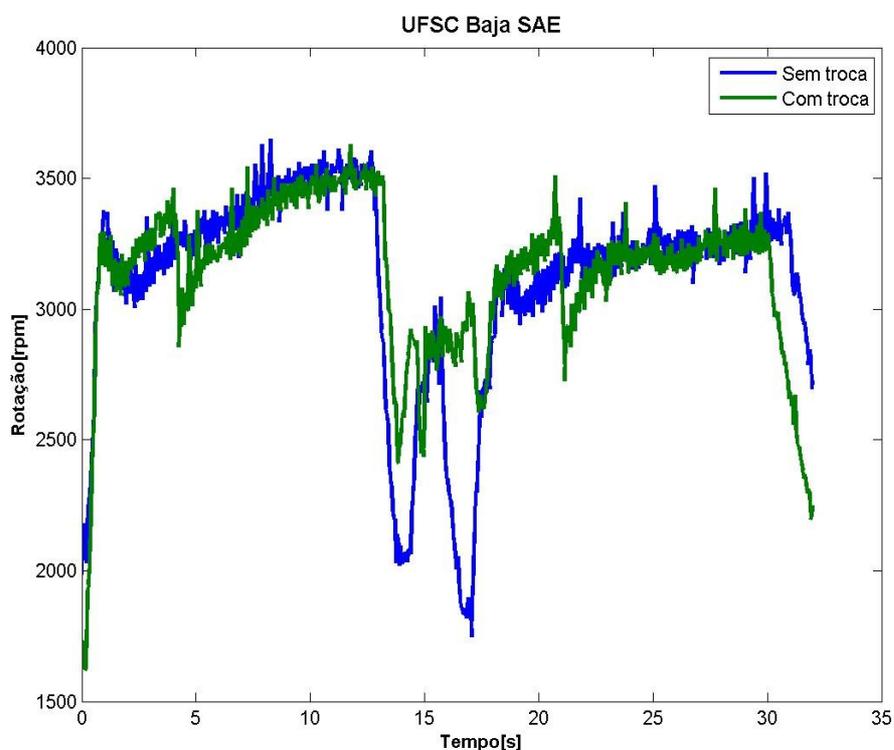


Figura 53: Teste comparativo na UFSC com e sem troca de marcha

No quesito otimização alcançada, na figura 53 é mostrada a otimização alcançada com a telemetria. Nesta, é apresentado o gráfico tempo x rotação do motor para um mesmo trajeto, porém sob duas condições de teste; na primeira, todo o trajeto é percorrido sem trocar de marcha, e a segunda, com troca de marchas. A análise do gráfico fornece as seguintes informações:

- Primeiro trecho (uma descida leve) compreendido entre 0~12s, o veículo está com força total; sem a troca de marcha, o baja chega mais rapidamente ao trecho 2.
- Segundo trecho (curva de 180° em baixa velocidade) compreendido entre 12~18s, com a troca de marcha o baja ligeiramente ganha alguns décimos de segundo.
- Terceiro trecho (subida suave – inverso do trecho 1), compreendido entre 18~32s, novamente com a troca de marchas garante-se redução de tempo em alguns segundos.

O trajeto completo (~470m) do teste pode ser visualizado na figura 54 (acesso da UFSC/CTC via pantanal).



Figura 55: Circuito de teste na UFSC

Com a instrumentação e telemetria pode-se também ajudar o piloto a reconhecer os trechos nos quais ele está cometendo erros e perdendo tempo, possibilitando a melhora de sua técnica de pilotagem e permitindo a obtenção de tempos menores.

Durante a implementação desse sistema de instrumentação, telemetria, painel de dados e controlador, encontrou-se inúmeros problemas. Desde pasta de solda causando curto-circuito, a problemas de comunicação de dados entre dispositivos, até outro sistema de telemetria estar ocupando o mesmo canal de comunicação utilizado. A tabela 7 sumariza as informações sobre cada um dos sistemas desenvolvidos ao final do trabalho. Mais detalhes sobre cada um dos problemas não-solucionados são apresentados nos parágrafos subsequentes.

Tabela 7: Problemas encontrados e característica de cada sistema implementado

Fenômeno físico mensurado	Comentários	Amostragem prevista (Hz)	Amostragem utilizada (Hz)	Resolução prevista	Resolução alcançada
Velocidade e rotação	Funcionamento correto	20	50	0.1km/h ou 1RPM	0.02km/h ou 1 RPM
Mapeamento da pista	Necessário re-programar máquina serial de recebimento e separação dos dados do GPS	10	10	0,0001° lat/lon, 0.1m altura	0,000001° lat/long, 0.1m altura
Posição suspensões e direção	Necessário migrar para modo rápido I2C para alcançar melhor resolução	50	50	0,5°	1,40625°
Sensor de marcha	Funcionamento correto	50	50	1 bit/marcha	1 bit/marcha
Sensor de gasolina	Funcionamento correto	1	50	8 níveis	8 níveis
Sensor de temperatura	Funcionamento correto	1	10	5°C	5°C
Tensão nos barramentos	Funcionamento correto	50	50	50mV	5~15mV
Corrente nas baterias	Funcionamento correto	50	50	10mA	1.2~4.9mA
Deformações mecânicas	Necessário testar na prática o funcionamento	100	100	0.01% de deformação	N/A
Entradas analógicas de precisão	Necessário testar na prática o funcionamento	100	100	14bits	14bits
Aceleração	Não está funcionando atualmente	200	200	10mg	10mg
Navegação inercial	Necessário re-programar o filtro passa-baixa e integração numérica	10	10	1° de deriva	N/A
Telemetria	Faltando implementar comunicação computador remoto → baja	-	-	-	-
Painel de informações	Necessário re-fazer arte de fundo dos mostradores de velocidade e rotação	-	-	-	-

N/A: Não disponível

A máquina comunicação serial, responsável por receber os dados do GPS e separar a informação desejada, apresentou problemas. Ocorrem erros na recepção dos dados. Em uma transferência envolvendo vários bytes em sequência, a máquina não está conseguindo fornecer fielmente os dados recebidos. Em *baudrates* baixos, este problema não é detectado. Diferentes implementações em Verilog foram efetuadas para resolver esse problema, porém nenhuma resultou em completa eficácia. Estudos mais aprofundados sobre o assunto sugeriram a possibilidade de metaestabilidade estar acontecendo no sinal recebido, visto que há

comunicação entre dois sistemas não sincronizados [22]. A técnica de *bufferizar* através de dois flip-flops [23] pode ser uma alternativa para solucionar o problema.

As entradas digitais estão funcionando corretamente, após estudo aprofundado e correções na máquina I2C. Inicialmente, a mesma não estava esperando tempo suficiente para efetuar a leitura dos expansores, e assim a informação enviada não fazia sentido físico. Após a implementação de um atraso, depois da requisição de leitura das entradas digitais, o problema foi sanado. Entretanto, a resolução dos encoders não foi satisfeita. Para alcançar o valor de resolução desejado de $0,5^\circ$, deve-se migrar a comunicação I2C dos expansores digitais do modo normal (100kHz) para o modo alta velocidade (400kHz), atingindo, dessa forma, uma resolução de $0,351^\circ$, o que superaria o valor desejado inicialmente.

O sistema de medição de deformações mecânicas e entradas analógicas de precisão ainda não foi testado e validado na prática. Não houve tempo para estes testes, porém o sistema de controle do conversor ADC de precisão já está implementado em verilog, faltando finalizar a máquina SPI de comunicação ADC precisão ↔ FPGA. Faltou também verificar a funcionalidade do filtro passa baixa 5ª ordem e possíveis problemas relacionados ao ponto de operação do mesmo.

O sistema de navegação inercial, constituído pelos giroscópios, foi parcialmente implementado na prática. A necessidade de fabricar duas placas extras para a leitura dos eixos Y e Z fez com que somente fosse possível implementar o eixo X. Porém, o código de leitura dos 3 eixos já está em funcionamento. Em relação à filtragem passa-baixa e integração numérica, ambas estão apresentando problemas de funcionamento. Na implementação feita, o código do FPGA está se perdendo devido aos dados lidos assumirem valores positivos e negativos.

Problemas relacionados com os acelerômetros foram encontrados. Os mesmos não estão atualmente respondendo aos comandos enviados pelo controlador. Porém em testes passados (2010), os acelerômetros estavam funcionando completamente, e o *hardware* e *software* utilizados na época são os mesmos utilizados atualmente, salvo sob uma pequena diferença de multiplexação do sinal *chip select*. Medição de sincronização dos sinais e verificação de violação

de tempo de escrita/leitura foram verificados via osciloscópio, porém o erro não foi encontrado.

Como melhoria para o sistema de instrumentação, pode-se adicionar uma função extra de aquisição, na qual é feita a telemetria somente dos canais de aceleração, porém à taxas maiores de 400Hz (3 acelerômetros), 800Hz (2 acelerômetros) e 1600Hz (1 acelerômetro), conseguindo, desse modo, captar frequências ainda mais altas e mais harmônicas da estrutura e do motor. Atualmente, na frequência normal de operação de 200Hz, e sabendo-se que o motor tem seu giro limitado a 3900RPM, consegue-se somente capturar a sua harmônica fundamental. Para testes de conforto e de esforços estruturais são necessárias taxas maiores de atualização - mostrando a necessidade de criar esta função a mais na instrumentação/telemetria.

Em relação ao sistema de telemetria, todos os dados estão sendo transmitidos e recebidos pelo computador remoto na estação base de forma correta. Porém, a comunicação computador→veículo não foi implementada, visto que esta será utilizada na configuração e otimização do FPGA/sensores, devendo possuir um sistema de verificação de erro. Na comunicação veículo→computador, esse tipo de verificação de erro nos dados não é implementada, devido às características de elevada taxa de atualização e simplicidade do sistema compensarem mais do que a redução da banda dos transceptores para implementar verificação de erro e re-envio de dados, caso necessário. Necessita-se, futuramente, desenvolver o software específico para o computador, o qual irá receber/transmitir os dados, salvar os dados recebidos para processamento e análise, além de apresentar os dados mais relevantes para a equipe dos boxes, em gráficos específicos em tempo real. Este software terá que trabalhar com a porta virtual serial, na taxa de comunicação 115200bps, e lidar com um montante atualmente de 7140 bytes de dados medidos a cada segundo. Numa corrida de 4 horas de duração (tempo máximo de corrida das competições Baja SAE), uma quantidade aproximada de 98GB de dados serão coletados.

Durante os testes realizados, descobriu-se também que na região da UFSC há outro sistema de telemetria de dados que utiliza o mesmo modelo de transceptor. Assim, para não influenciar os dados desse trabalho, os transceptores utilizados

nesse sistema passaram a operar no canal 1 ao invés do canal 0 (padrão). Com esta mudança, o sistema voltou a funcionar completamente.

O sistema do painel está funcionando corretamente, porém há necessidade de se fabricar uma nova arte de fundo dos mostradores do velocímetro e contagiros. A arte utilizada atualmente não satisfaz os requisitos de bloqueio total da luz de backlight nas regiões brancas e passagem da luz nos números, letras e logo. A distribuição de leds de *backlight* pode ser melhorada para reduzir as áreas com pouca luminosidade. O mostrador de nível de gasolina também pode ser melhorado, utilizando guia de luz para melhorar a distribuição espacial do brilho, que atualmente é concentrado no centro e fraco nas pontas, para algo mais homogêneo na sua totalidade.

Os sistemas de instrumentação, telemetria, painel de dados e controlador já possuem mais de 60 horas de uso integrado, sem apresentar problemas e/ou travar. Dessa forma, validaram-se os circuitos desenvolvidos, principalmente as fontes de alimentação e algoritmos de controle.

Tabela 8: Custo do sistema desenvolvido

DESCRIÇÃO	CUSTO (US\$)
Controlador FPGA	\$120.00
Transceptores + antenas	\$400.00
Componentes Eletrônicos	\$180.00
Placas de Circuito Impresso	\$430.00
Sensores	\$540.00
Farol e luz de freio	\$160.00
Estrutura painel de instrumentação	\$120.00
Conectores, cabos e miscelâneas	\$440.00
TOTAL	\$2,390.00

Em relação à questão financeira, o objetivo também foi alcançado. O sistema completo foi implementado utilizando apenas uma fração do custo de sistemas semelhantes (dezenas de milhares de dólares). Na tabela 8 pode-se visualizar os principais custos relativos à fabricação do sistema completo. Caso haja uma

fabricação em série, todas as placas serão montadas via máquinas automáticas – visto que todas elas utilizam somente componentes SMD – o que proporcionaria baixo tempo de montagem e custo reduzidos, além dos valores dos componentes, placas e conectores serem ainda menores devido à elevada quantidade; garantindo dessa maneira, elevada margem de lucro à empresa a um custo operacional de fabricação muito baixo. Sugere-se ainda, caso haja produção e venda desse sistema, o desenvolvimento de uma única placa contendo o controlador FPGA e o sistema de instrumentação, o que proporcionaria custos de fabricação ainda menores.

Capítulo 7: Conclusões e perspectivas

O objetivo do trabalho foi desenvolver um sistema de instrumentação, telemetria e painel de informações. Inicialmente, foram apresentadas à Equipe UFSC Baja SAE as vantagens da utilização de um sistema desse tipo, e a importância da eletrônica veicular, mostrando que, para cada sistema de automóvel, há um tipo específico de sensor a ser utilizado. Posteriormente, definiu-se o modelo de sensoreamento utilizado, assim como as funções e características dos sistemas de instrumentação, telemetria e painel de informações ao piloto, finalizando com a escolha e características do controlador utilizado.

O passo seguinte foi o levantamento bibliográfico das técnicas potencialmente vantajosas para a polarização de sensores, condicionamento de sinais, processamento de dados, interfaceamento homem-máquina, e transmissão de informações via radiofrequência. O controle de todos esses sistemas foi implementado através de processamento paralelo via FPGA. Este controle ainda pode ser ampliado a novos sensores e funções, visto que apenas 29% da capacidade lógica do FPGA é utilizada, o que torna esse sistema apto para otimizações futuras, como, por exemplo, a instalação de câmera de vídeo para obter, sincronizadas com os dados medidos, imagens de obstáculos ou da pista; a utilização de magnetômetros para corrigir a deriva, devido à integração numérica dos giroscópios, e assim fornecerem um sistema de navegação inercial mais preciso; sensores de pressão do tipo Pitot, para mensurar a pressão aerodinâmica em diferentes partes da carenagem do veículo; além de um projeto contemplando a integração numa única placa de circuito impresso do controlador, do sistema de instrumentação, e a utilização de conectores selados mais densos – como os da JST –, que proporcionariam redução de espaço e massa do conjunto como um todo.

Alguns softwares foram de grande importância, desde o projeto teórico até o projeto físico final, como o MatLab, software de cálculo numérico, utilizado para otimização e definição matemática de componentes eletrônicos; o EAGLE, utilizado para a confecção dos circuitos e layout das placas de circuito impresso; o

ModelSIM, software de simulação de lógica programável; e também o Xilinx ISE, ambiente gráfico completo de programação e compilação dos códigos em Verilog.

O estudo dos sistemas durante testes em bancada foi bastante produtivo. Primeiramente, foi possível validar a funcionalidade das fontes de alimentação e baterias sob as condições de carga exigidas e, posteriormente, verificar a correta operação de cada sensor e luzes utilizadas. A comunicação de dados entre os sistemas e circuitos implementados e os testes de integridade de sinal também foram fundamentais para garantir a fidedignidade dos valores lidos.

O projeto do sistema como um todo proporcionou maior visão das não-idealidades do sistema real, e também possibilitou o aprimoramento dos conhecimentos práticos de projeto, layout, montagem e validação de circuitos eletrônicos, além de ampliar o conhecimento sobre gestão de pessoas e metodologia de projetos de engenharia. O resultado mostrou-se muito satisfatório, pois os objetivos propostos foram concluídos com sucesso, apesar das dificuldades durante a realização.

Por fim, destaca-se a importância do sistema desenvolvido. Para a UFSC, este poderá ser utilizado por todas as equipes de competições de engenharia, visto que engloba uma grande gama de sensores, permitindo que cada vez mais estudantes dediquem-se à atividade de pesquisa e desenvolvimento tecnológico, além de permitir que as equipes alcancem resultados ainda mais expressivos. E, para o Brasil, por ser um produto 100% nacional, de alto valor agregado, e principalmente pela possibilidade de ser utilizado como ferramenta de desenvolvimento para veículos nacionais mais eficientes, velozes e de alta tecnologia.

Bibliografia:

- [1] MCBEATH, S., “Competition Car Data Logging: A practical Handbook”, Haynes Publishing, 2002.
- [2] TREMAYNE David, “The Science of Formula 1 Design”, Haynes Publishing, 2ª edição, 2006.
- [3] “Data Acquisition for Competition Vehicles – Clemson University” http://www.cvel.clemson.edu/auto/AuE835_Projects/callies_project.html Data da consulta: 19/07/2011.
- [4] “Design Guide for Electronic Packaging Utilizing High-Speed Techniques” 4º Working Draft, IPC-2251, FEV/2001.
- [5] “Backlight Technology Overview” www.densitron.com/uploadedFiles/Displays/Support/LED%20Backlight%20Technology%20White%20Paper.pdf Data da consulta: 10/06/2011.
- [6] “Optical display solution 3M” http://solutions.3m.com/wps/portal/3M/en_US/Vikuiti1/BrandProducts/main/marketsweserve/oem/notebook/ Data da consulta: 18/06/2011.
- [7] “Innovate Keypad Design with Light Guides and Leds” Avago Technologies <http://www.avagotech.com/docs/AV02-2241EN> Data da consulta: 18/06/2011.
- [8] “Application Brief I-003” Avago Technologies <http://www.avagotech.com/docs/5988-7057EN> Data da consulta: 18/06/2011.
- [9] “ISL28470 Data Sheet” <http://www.intersil.com/data/fn/fn6260.pdf> Data da consulta: 30/06/2011.
- [10] “ADS7871 Data Sheet” <http://focus.ti.com/general/docs/lit/getliterature.tsp?literatureNumber=slas370c&fileType=pdf> Data da consulta: 22/06/2011
- [11] FILHO, Sidnei Noceti, “Filtros Seletores de Sinais” Editora da UFSC, 2ª edição, 2003.

- [12] “XT09 Transceiver Data Sheet” http://www.digi.com/pdf/ds_xtendmodule.pdf
Data da consulta: 30/06/2011.
- [13] “LS676 sideled Data Sheet” <http://catalog.osram-os.com/catalogue/catalogue.do;jsessionid=E24F83299D38BE8AB78B6FE3DB2ABF62?act=downloadFile&favOid=0200000200003436000100b6>
Data da consulta: 30/06/2011.
- [14] SEDRA, Adel S. e SMITH, Kenneth “Microeletrônica”, Pearson Makron Books, 4ª edição, São Paulo, 2000.
- [15] “IRF7807 Data Sheet” <http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/irf7807.pdf> Data da consulta: 12/07/2011.
- [16] “IRF7420 Data Sheet” <http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/irf7420.pdf> Data da consulta: 12/07/2011.
- [17] “Led 14W Data Sheet” <http://www.yingfai-led.com/en/productinfo.aspx?id=546&productypeid=81> Data da consulta: 12/07/2011.
- [18] “LTC14745 Data Sheet” <http://cds.linear.com/docs/Datasheet/14745fas.pdf>
Data da consulta: 12/07/2011.
- [19] “LT3695 Data Sheet” <http://cds.linear.com/docs/Datasheet/3695fa.pdf> Data da consulta: 12/07/2011.
- [20] “AMT103 Data Sheet” <http://products.cui.com/getPDF.aspx?fileID=3427> Data da consulta: 12/07/2011.
- [21] “GMM-U1 Data Sheet” <http://www.gtop-tech.com/ShowAttach;jsessionid=FF739DF26BAFD8AF86972CC1D1C90CD8?UNID=ee71b46ba43042970de7592797837ed00236b24c> Data da consulta: 21/7/2011.
- [22] KILTS, Steve “Advanced FPGA design: Architecture, Implementation and Optimization”, Wiley Inter-Science, 2007.
- [23] CHU, Pong P. “FPGA prototyping by Verilog examples: Xilinx Spartan 3 version”, Wiley, 2008.

- [24] “Module for Simpson's 3/8 Rule for Numerical Integration”
<http://math.fullerton.edu/mathews/n2003/Simpson38RuleMod.html> Data da consulta: 21/7/2011.
- [25] “ADXL345 Data Sheet” http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADXL345.pdf Data da consulta: 25/7/2011.
- [26] “Application note 105: Current sense circuit collection”
http://www.linear.com/ad/12-high_current.pdf Data da consulta: 25/7/2011.
- [27] OTT, Henry W. “Noise reduction techniques in electronic systems”, Wiley Interscience, 2ª edição, 1988.

Apêndice A:

```
% THIS MFILE IS USED TO EVALUATE THE TOTAL LENGTH OF THE FLOAT OT BE USED
% INSIDE THE GAS TANK TO MEASURE THE GASOLINE LEVEL
%
% PROJECT: BAJA/UFSC
% ENGINEERING: GUSTAVO LEAO MOREIRA
% DATE: 24/07/2009
%
% MAGNETIC MASS(g)
m_ima = 1.8;
% CLIPS MASS(g)
m_clips = 0.775
% WALL THICKNESS(cm)
t = 0.09;
% DENSITY POLIACETAL(g/cm³)
d_poli = 0.88;
% DENSITY GASOLINE(g/cm³)
d_gas = 0.7;
% RELATIVE FLOAT VOLUME
K = 0.8;
% BOTTON MAXIMUM RADIUS(cm)
r_inf = 3.3/2;
% WALL ANGLE
alpha = (35-33)/(2*18);
% TOTAL LENGHT
h = 0.8:0.1:2;
% WALL VOLUME
v_wall = pi*h*(2*r_inf*t - t^2) + pi*t*alpha*h.^2;
% TOTAL VOLUME
v_tot = pi*r_inf^2*h + pi*r_inf*alpha*h.^2 + pi*alpha^2*h.^3/3;
% EVALUATING THE FLOAT CONSTANT RELATED TO THE LENGHT
for i=1:length(m_clips)
    k(i) = {(m_ima + m_clips(i) + d_poli*(v_wall + t*(pi*r_inf^2 + pi*(r_inf + alpha*h).^2))}/(v_tot*d_gas)};
end
% PLOTING THE RESULTS
figure(1)
plot(h, k{1})
xlabel('Comprimento da Bóia[cm]')
ylabel('Flutuabilidade Relativa à gasolina')
title('UFSC Baja SAE - DIMENSIONAMENTO BÓIA TANQUE(Diametro 33mm)')
%legend('Massa = 1.5g','Massa = 1.6g','Massa = 1.7g','Massa = 1.8g','Massa = 1.9g','Massa = 2.0g')
axis([0.8 2 0.4 1.2])
grid on
saveas(figure(1), 'C:\Users\Owner\Documents\My Dropbox\ufsc\tcc\relatorio\imagens\densidade_boia_tank.jpg','jpg')

figure(2)
plot(h, k{1}, 1.2, k{1}(5), 'Oblack')
xlabel('Comprimento da Bóia[cm]')
ylabel('Flutuabilidade Relativa à gasolina')
title('UFSC Baja SAE - DIMENSIONAMENTO BÓIA TANQUE(Diametro 33mm)')
legend('Valores possíveis','Valor utilizado')
%axis([0.8 2 0.4 1])
grid on
saveas(figure(2), 'C:\Users\Owner\Documents\My
Dropbox\ufsc\tcc\relatorio\imagens\densidade_boia_tank_unique.jpg','jpg')
```

Apêndice B:

```
//BUFFER SERIAL CONTROLLER – UFSC BAJA SAE
//BUFFER TRANSCEIVER 200Hz
always @(posedge clock_200Hz) begin
    if (buffer_200Hz) begin
        buffer_tx_rf[0] <= acce_x0[7:0];
        buffer_tx_rf[1] <= acce_x0[15:8];
        buffer_tx_rf[2] <= acce_y0[7:0];
        buffer_tx_rf[3] <= acce_y0[15:8];
        buffer_tx_rf[4] <= acce_z0[7:0];
        buffer_tx_rf[5] <= acce_z0[15:8];
        buffer_tx_rf[6] <= acce_x1[7:0];
        buffer_tx_rf[7] <= acce_x1[15:8];
        buffer_tx_rf[8] <= acce_y1[7:0];
        buffer_tx_rf[9] <= acce_y1[15:8];
        buffer_tx_rf[10] <= acce_z1[7:0];
        buffer_tx_rf[11] <= acce_z1[15:8];
    end else begin
        buffer_tx_rf[12] <= acce_x0[7:0];
        buffer_tx_rf[13] <= acce_x0[15:8];
        buffer_tx_rf[14] <= acce_y0[7:0];
        buffer_tx_rf[15] <= acce_y0[15:8];
        buffer_tx_rf[16] <= acce_z0[7:0];
        buffer_tx_rf[17] <= acce_z0[15:8];
        buffer_tx_rf[18] <= acce_x1[7:0];
        buffer_tx_rf[19] <= acce_x1[15:8];
        buffer_tx_rf[20] <= acce_y1[7:0];
        buffer_tx_rf[21] <= acce_y1[15:8];
        buffer_tx_rf[22] <= acce_z1[7:0];
        buffer_tx_rf[23] <= acce_z1[15:8];
    end
end

//BUFFER TRANSCEIVER 100Hz
always @(posedge clock_100Hz) begin
    buffer_tx_rf[24] <= ~buffer_tx_rf[24]; //adc_sg0[7:0];
    buffer_tx_rf[25] <= {clock_20Hz}; //adc_sg1[7:0];
    buffer_tx_rf[26] <= 0; //adc_sg2[7:0];
    buffer_tx_rf[27] <= 0; //adc_sg3[7:0];
    buffer_tx_rf[28] <= 0; //adc_sg4[7:0];
    buffer_tx_rf[29] <= 0; //adc_sg5[7:0];
    buffer_tx_rf[30] <= 0; //adc_sg6[7:0];
    buffer_tx_rf[31] <= 0; //adc_sg7[7:0];
    buffer_tx_rf[32] <= 0; //2'b00, adc_sg0[13:8];
    buffer_tx_rf[33] <= 0; //2'b00, adc_sg1[13:8];
    buffer_tx_rf[34] <= 0; //2'b00, adc_sg2[13:8];
    buffer_tx_rf[35] <= 0; //2'b00, adc_sg3[13:8];
    buffer_tx_rf[36] <= 0; //2'b00, adc_sg4[13:8];
    buffer_tx_rf[37] <= 0; //2'b00, adc_sg5[13:8];
    buffer_tx_rf[38] <= 0; //2'b00, adc_sg6[13:8];
    buffer_tx_rf[39] <= 0; //2'b00, adc_sg7[13:8];
    buffer_tx_rf[40] <= "-"; //END OF DATA
    buffer_tx_rf[41] <= "-"; //END OF DATA
end

//BUFFER TRANSCEIVER 50Hz
always @(posedge clock_50Hz) begin
    buffer_tx_rf[42] <= "-"; //START OF FRAME;
    buffer_tx_rf[43] <= "-"; //START OF FRAME;
    buffer_tx_rf[44] <= "5"; //START OF FRAME;
    buffer_tx_rf[45] <= "0"; //START OF FRAME;
    buffer_tx_rf[46] <= "H"; //START OF FRAME;
    buffer_tx_rf[47] <= "z"; //START OF FRAME;
    buffer_tx_rf[48] <= "-"; //START OF FRAME;
    buffer_tx_rf[49] <= "-"; //START OF FRAME;
    buffer_tx_rf[50] <= pos_encoder0[7:0]; //10bits - SUSPENSION
    buffer_tx_rf[51] <= pos_encoder1[7:0]; //10bits - SUSPENSION
    buffer_tx_rf[52] <= pos_encoder2[7:0]; //10bits - SUSPENSION
end
```

```

buffer_tx_rf[53] <= pos_encoder3[7:0]; //10bits - SUSPENSION
buffer_tx_rf[54] <= pos_encoder4[7:0]; //8bits - STEERING WHEEL
buffer_tx_rf[55] <= {pos_encoder0[9:8], pos_encoder1[9:8], pos_encoder2[9:8],
pos_encoder3[9:8]};

buffer_tx_rf[56] <= adc0_0[7:0]; //VBAT
buffer_tx_rf[57] <= adc0_1[7:0]; //VBAT
buffer_tx_rf[58] <= adc0_2[7:0]; //VBAT
buffer_tx_rf[59] <= adc0_3[7:0]; //VBAT
buffer_tx_rf[60] <= adc0_4[7:0]; //VCC5V0
buffer_tx_rf[61] <= adc0_5[7:0]; //VCC3V3
buffer_tx_rf[62] <= adc0_6[7:0]; //VCC3V3
buffer_tx_rf[63] <= adc1_0[7:0]; //ACCELE_PEDAL_POS
buffer_tx_rf[64] <= adc1_1[7:0]; //BRAKE_PEDAL_POS
buffer_tx_rf[65] <= adc1_5[7:0]; //CURRENT_BAT
buffer_tx_rf[66] <= adc1_6[7:0]; //CURRENT_BAT
buffer_tx_rf[67] <= adc1_7[7:0]; //CURRENT_BAT
buffer_tx_rf[68] <= {adc0_0[9:8], adc0_1[9:8], adc0_2[9:8], adc0_3[9:8]};
buffer_tx_rf[69] <= {adc0_4[9:8], adc0_5[9:8], adc0_6[9:8], adc1_0[9:8]};
buffer_tx_rf[70] <= {adc1_1[9:8], adc1_5[9:8], adc1_6[9:8], adc1_7[9:8]};
buffer_tx_rf[71] <= speed0[7:0]; //EXTRA
buffer_tx_rf[72] <= speed1[7:0]; //EXTRA
buffer_tx_rf[73] <= speed2[7:0]; //MOTOR
buffer_tx_rf[74] <= speed3[7:0]; //FRONT
buffer_tx_rf[75] <= speed4[7:0]; //FRONT
buffer_tx_rf[76] <= speed5[7:0]; //REAR
buffer_tx_rf[77] <= {speed0[11:8], speed1[11:8]};
buffer_tx_rf[78] <= {speed2[11:8], speed3[11:8]};
buffer_tx_rf[79] <= {speed4[11:8], speed5[11:8]};
buffer_tx_rf[80] <= data_gpio[7:0]; //GAS_LEVEL, BUTTONS
buffer_tx_rf[81] <= data_gpio[15:8]; //GEAR, HORN, BRAKE
buffer_tx_rf[82] <= {2'b00, gas_level_display}; //NIVEL GASOLINA
buffer_tx_rf[83] <= ~buffer_tx_rf[83]; //EXTRA

end

//BUFFER TRANSCEIVER 10Hz
always @(posedge clock_10Hz) begin
buffer_tx_rf[84] <= gyro_pos_x[7:0];
buffer_tx_rf[85] <= gyro_pos_x[15:8];
buffer_tx_rf[86] <= gyro_pos_y[7:0];
buffer_tx_rf[87] <= gyro_pos_y[15:8];
buffer_tx_rf[88] <= gyro_pos_z[7:0];
buffer_tx_rf[89] <= gyro_pos_z[15:8];
buffer_tx_rf[90] <= 0; //magnet_x[7:0];
buffer_tx_rf[91] <= 0; //magnet_y[7:0];
buffer_tx_rf[92] <= 0; //magnet_z[7:0];
buffer_tx_rf[93] <= 0; //magnet_x[15:8];
buffer_tx_rf[94] <= 0; //magnet_y[15:8];
buffer_tx_rf[95] <= 0; //magnet_z[15:8];
buffer_tx_rf[96] <= temperature; //TEMP_ELECTRONICS
buffer_tx_rf[97] <= adc1_2[7:0]; //TEMP_ENGINE
buffer_tx_rf[98] <= adc1_3[7:0]; //TEMP_GEAR
buffer_tx_rf[99] <= adc1_4[7:0]; //TEMP_CVT
buffer_tx_rf[100] <= adc0_7[7:0]; //TEMP_BAT
buffer_tx_rf[101] <= {adc1_2[9:8], adc1_3[9:8], adc1_4[9:8], adc0_7[9:8]};
buffer_tx_rf[102] <= "G"; //GPS
buffer_tx_rf[103] <= "P"; //GPS
buffer_tx_rf[104] <= "S"; //GPS
buffer_tx_rf[105] <= 0; //GPS D
buffer_tx_rf[106] <= 0; //GPS D
buffer_tx_rf[107] <= 0; //GPS M
buffer_tx_rf[108] <= 0; //GPS M
buffer_tx_rf[109] <= "2"; //GPS Y
buffer_tx_rf[110] <= "0"; //GPS Y
buffer_tx_rf[111] <= "1"; //GPS Y
buffer_tx_rf[112] <= "1"; //GPS Y
buffer_tx_rf[113] <= 0; //GPS H
buffer_tx_rf[114] <= 0; //GPS H
buffer_tx_rf[115] <= 0; //GPS M
buffer_tx_rf[116] <= 0; //GPS M
buffer_tx_rf[117] <= "5"; //GPS S
buffer_tx_rf[118] <= "9"; //GPS S
buffer_tx_rf[119] <= "2"; //GPS S
buffer_tx_rf[120] <= 0; //GPS LAT
buffer_tx_rf[121] <= 0; //GPS LAT
buffer_tx_rf[122] <= 0; //GPS LAT

```

```

buffer_tx_rf[123] <= 0; //GPS LAT
buffer_tx_rf[124] <= "."; //DECIMAL POINT
buffer_tx_rf[125] <= 0; //GPS LAT
buffer_tx_rf[126] <= 0; //GPS LAT
buffer_tx_rf[127] <= 0; //GPS LAT
buffer_tx_rf[128] <= 0; //GPS LAT
buffer_tx_rf[129] <= 0; //GPS LAT
buffer_tx_rf[130] <= 0; //GPS LAT
buffer_tx_rf[131] <= 0; //GPS N or S
buffer_tx_rf[132] <= 0; //GPS LON
buffer_tx_rf[133] <= 0; //GPS LON
buffer_tx_rf[134] <= 0; //GPS LON
buffer_tx_rf[135] <= 0; //GPS LON
buffer_tx_rf[136] <= "."; //DECIMAL POINT
buffer_tx_rf[137] <= 0; //GPS LON
buffer_tx_rf[138] <= 0; //GPS LON
buffer_tx_rf[139] <= 0; //GPS LON
buffer_tx_rf[140] <= 0; //GPS LON
buffer_tx_rf[141] <= 0; //GPS LON
buffer_tx_rf[142] <= 0; //GPS LON
buffer_tx_rf[143] <= 0; //GPS E or W
buffer_tx_rf[144] <= 0; //GPS ALT
buffer_tx_rf[145] <= 0; //GPS ALT
buffer_tx_rf[146] <= 0; //GPS ALT
buffer_tx_rf[147] <= "."; //DECIMAL POINT
buffer_tx_rf[148] <= 0; //GPS ALT
buffer_tx_rf[149] <= ","; //SEPARATE DATA
buffer_tx_rf[150] <= 0; //GPS SATELLITES USED
buffer_tx_rf[151] <= 0; //GPS POS INDICATOR
buffer_tx_rf[152] <= ","; //SEPARATE DATA
buffer_tx_rf[153] <= 0; //GPS SPEED
buffer_tx_rf[154] <= 0; //GPS SPEED
buffer_tx_rf[155] <= 0; //GPS SPEED
buffer_tx_rf[156] <= "."; //DECIMAL POINT
buffer_tx_rf[157] <= 0; //GPS SPEED
buffer_tx_rf[158] <= 0; //GPS SPEED
buffer_tx_rf[159] <= ","; //SEPARATE DATA
buffer_tx_rf[160] <= 0; //GPS COURSE
buffer_tx_rf[161] <= 0; //GPS COURSE
buffer_tx_rf[162] <= 0; //GPS COURSE
buffer_tx_rf[163] <= "."; //DECIMAL POINT
buffer_tx_rf[164] <= 0; //GPS COURSE
buffer_tx_rf[165] <= 0; //GPS COURSE
buffer_tx_rf[166] <= "E"; //END OF DATA
buffer_tx_rf[167] <= "N"; //END OF DATA
buffer_tx_rf[168] <= "D"; //END OF DATA

end

//-----//
//CONTROL THE TRANSCEIVER RF LINK - TX BUFFER //
//-----//
always @(posedge clock_2MHz) begin
//RISING EDGE OF 10Hz
if (!clock_10Hz) begin
rising_10Hz <= 1'b1;
end
if ((clock_10Hz) && (rising_10Hz)) begin
rising_10Hz <= 1'b0;
buffer_10Hz <= 1'b1;
end
//FALLING EDGE DETECTOR
if (!clock_100Hz) begin
rising_100Hz <= 1'b1;
end
//FALLING EDGE OF 200Hz CLOCK
if ((clock_100Hz) && (rising_100Hz)) begin
rising_100Hz <= 1'b0;
send_rf_tx_data <= 1'b1;
if (buffer_50Hz) begin
if (buffer_10Hz) begin
if (pack_10Hz == 0) begin
buffer_tx_rf_length <= BUFFER_10Hz_HALF;
pack_10Hz <= 1;
end else if (pack_10Hz == 1) begin
buffer_tx_rf_length <= BUFFER_10Hz_FULL;

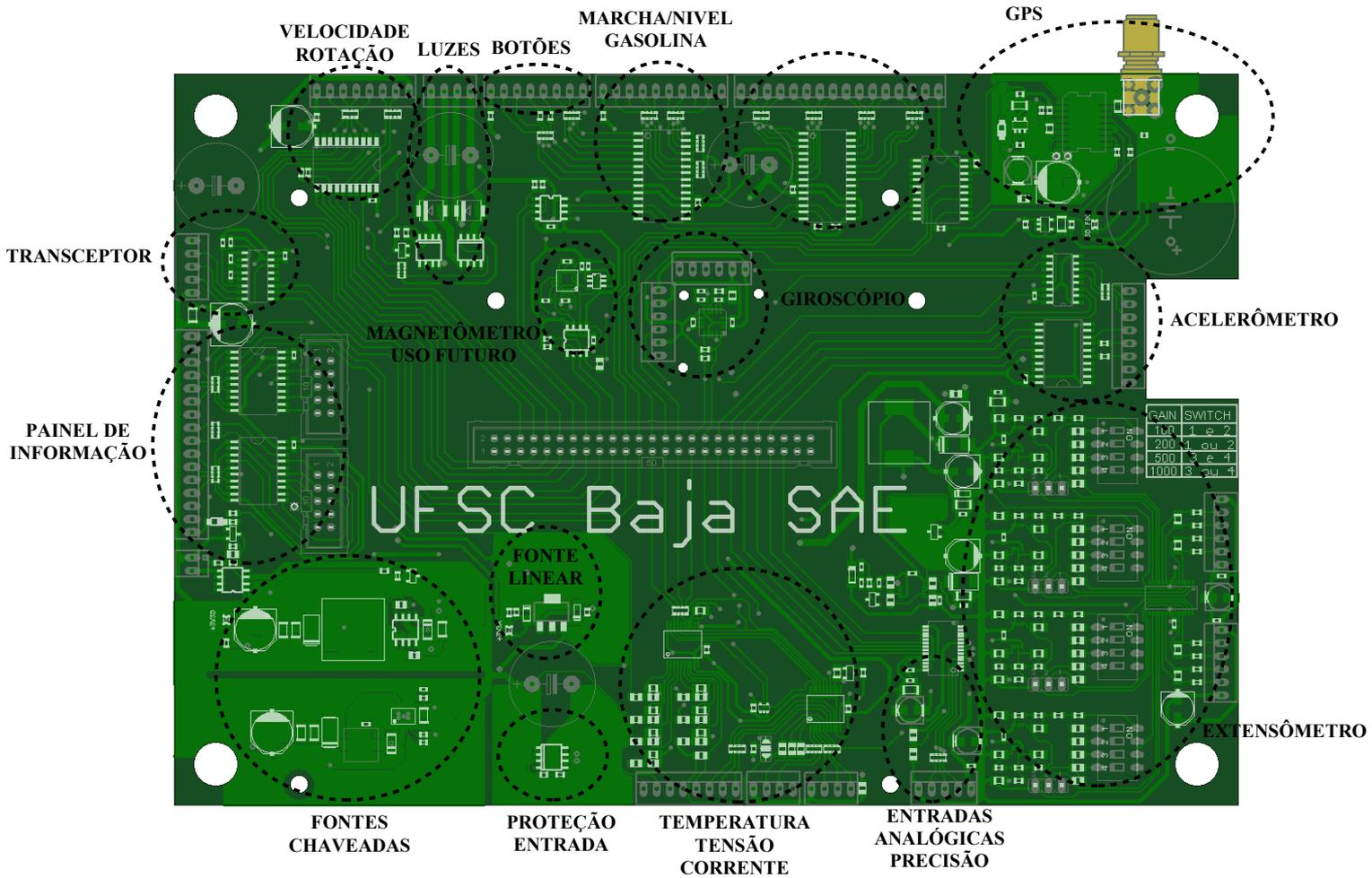
```

```

                                pack_10Hz <= 0;
                                buffer_10Hz <= 1'b0;
                                end
                                end else begin
                                    buffer_tx_rf_length <= BUFFER_100Hz_200Hz;
                                end
                                end else begin
                                    buffer_tx_rf_length <= BUFFER_50Hz;
                                end
                                end
                                //SENDING THE DATA THROUGH THE SERIAL PORT
                                rf_start <= 1'b0;
                                if (send_rf_tx_data) begin
                                    if (!busy_tx_rf) begin
                                        rf_start <= 1'b1;
                                        rf_write <= buffer_tx_rf[i_tx_rf];
                                        i_tx_rf = i_tx_rf + 1;
                                        if (i_tx_rf == BUFFER_100Hz_200Hz) begin
                                            if (buffer_tx_rf_length == BUFFER_10Hz_HALF) begin
                                                i_tx_rf = BUFFER_50Hz;
                                            end else if (buffer_tx_rf_length == BUFFER_10Hz_FULL) begin
                                                i_tx_rf = BUFFER_10Hz_HALF;
                                            end
                                        end
                                        end
                                        //DETECT THE END OF TRANSMISSION
                                        if (i_tx_rf == buffer_tx_rf_length) begin
                                            i_tx_rf = 0;
                                            send_rf_tx_data <= 0;
                                        end
                                    end
                                end
                                end
                                end
end

```

Apêndice C:



Apêndice D:

