UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE ENGENHARIA
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA

ALLISON ADONES DOS SANTOS

Comunicação CAN Transmitida por PLC Aplicada em Veículo de Fórmula SAE

ILHA SOLTEIRA

2021

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Ilha Solteira

ALLISON ADONES DOS SANTOS

Comunicação CAN Transmitida por PLC Aplicada em Veículo de Fórmula SAE

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – Unesp como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Ricardo Tokio Higuti
Orientador

ILHA SOLTEIRA
2021

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

Santos, Allison Adones dos.
A237c Comunicação CAN transmitida por PLC aplicada em veículo de fórmula SAE /Allison Adones dos Santos. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2021
74 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2021

Orientador: Ricardo Tokio Higuti

Inclui bibliografia

1. Power Line Communication. 2. Controller Area Network. 3. Fórmula SAE. 4. Compartilhamento de fio. 5. Painel. 6. Alimentação mais comunicação com dois fios.

Raiane da Silva Santos
Supervisora Técnica de Seção
Seção Técnica de Referência, Atendimento ao usuário e Documentação
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação
CRB/8 - 9999

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Câmpus de Ilha Solteira

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Aos oito dias do mês de dezembro do ano de dois mil e vinte e um, o discente ***Allison Adones dos Santos,*** matriculado sob o nº 141052759, tendo como banca examinadora o seu orientador o *Prof. Dr. Ricardo Tokio Higuti*, a *Profª. Drª. Suely Cunha Amaro Mantovani* e o Ms. Eng. *Júlio Cesar Eduardo de Souza*, apresentou o Trabalho de Graduação intitulado **"COMUNICAÇÃO CAN TRANSMITIDA POR PLC APLICADA EM VEÍCULO DE FÓRMULA SAE"** obtendo a nota 10,0 (dez) e conceito APROVADO.

Prof. Dr. Ricardo Tokio Higuti
- orientador -

Allison Adones dos Santos
- discente -

Profª. Drª. Suely Cunha Amaro Mantovani
- Membro da Banca -

Ms. Eng. Júlio Cesar Eduardo de Souza
- Membro da Banca -

Faculdade de Engenharia – Departamento de Engenharia Elétrica
Avenida Professor José Carlos Rossi, 1370 - CEP 15.385-000, Ilha Solteira - SP - Brasil
Tel (18) 37431150 - Fax (18) 3742-2735 - www.feis.unesp.br

Resumo

Neste trabalho de conclusão de curso foi proposto e implementado um sistema embarcado capaz de estabelecer uma comunicação digital por meio das mesmas vias pela qual o circuito recebe a alimentação elétrica. O projeto consiste em uma placa capaz de receber a comunicação *Controller Area Network* (CAN) do carro, que modula em frequência os dados recebidos, e os retransmite por *Power Line Communication* (PLC) para uma segunda placa, que é capaz de interpretar este sinal e restaurar as informações originais. Neste projeto as informações servem para apresentar ao piloto a velocidade do carro, sua marcha atual e a rotação do motor. As soluções propostas e componentes utilizados para desenvolver o projeto, são apresentados detalhadamente, para que seja possível reproduções e aprimoramentos. O projeto foi implementado na prática, e seu funcionamento e viabilidade técnica são mostrados por medições coletadas. Algumas imagens do projeto são apresentadas para ilustrar o funcionamento. Os resultados obtidos embasam algumas sugestões de melhorias que podem ser aplicadas.

Palavras Chave: Fórmula SAE, Power Line Communication, Compartilhamento de Fio, Alimentação mais comunicação com dois fios, Controller Area Network.

Abstract

This work proposes and develops an embedded system capable of transmitting a digital communication using the same cable as the electrical supply. The project consists of an electronic board capable of receiving the vehicle's Controller Area Network (CAN) communication. This board adjusts the frequency of the receiving data and passes them down through Power Line Communication (PLC) to a second board, which is able to read and demodulate the original information. In the presented project this information refers to the car's speed, gear and motor rotation. The proposed solutions and components used to develop the project are presented in detail, so that reproductions and improvements are possible. The project was implemented in practice, and its operation and technical feasibility are demonstrated by measurements collected in the project, in addition to measurements, some images of the project in operation are presented. The results obtained support some comments with some proposals for improvements.

Key Words: Formula SAE, Power Line Communication, Wire Share, Power Supply Wires With Communication, Controller Area Network.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Competição fórmula SAE em Michigan, 2019.....10
Figura 2: Painel de um carro popular.....11
Figura 3: Sistema roda fônica mais sensor HALL.....12
Figura 4: Câmbio representando as relações fixas das marchas.....13
Figura 5: Apresentação do painel ao piloto.....14
Figura 6: Placa e conjunto de fios necessários ao funcionamento do painel.....15
Figura 7: Aspectos de *hardware* da rede CAN.....18
Figura 8: Protocolo de mensagens CAN.....18
Figura 9: ECU MegaSquirt MS3 internamente.....20
Figura 10: Opções de dados que podem ser solicitados.....21
Figura 11: Sinal modulador m(t) e portadora C(t), ambos compondo um sinal FM S(t).....22
Figura 12: Diagrama geral do projeto.....25
Figura 13: Formato do sinal modulador.....26
Figura 14: Gerador do sinal de onda quadrada portador.....27
Figura 15: Circuito controlador de capacitância.....28
Figura 16: Circuito modulador de frequência completo.....29
Figura 17: Circuito somador de sinais.....30
Figura 18: Formato do sinal de transmissão.....30
Figura 19: Circuito filtro(a); Alimentação filtrada(b); Informação filtrada (c).....31
Figura 20:(a) Circuito condicionador; (b) Sinal de informação original; (c) Sinal condicionado.....32
Figura 21: Representação do painel apresentador.....33
Figura 22: Fluxograma e código responsável por receber pacotes CAN e salvá-los.....34
Figura 23: Processo de serialização dos dados.....35
Figura 24: Formato dos campos de dados.....36
Figura 25: Modo de formação do sinal modulador.....36
Figura 26: Fluxograma e código do filtro.....38
Figura 27: Metodologia para multiplexação de displays.....39
Figura 28: Observação do sinal de saída do Atmega328P.....42
Figura 29: Comparação entre alta(a) e baixa(b) frequência da portadora.....43
Figura 30: Sinal portador(azul) vs sinal modulador(amarelo).....44
Figura 31: Sinal composto de alimentação mais FM.....45

Figura 32: Sinal composto variando de acordo com o modulador.....46
Figura 33: Sinal composto(amarelo) sinal após filtro RC(azul).....47
Figura 34: Sinal composto(amarelo) e sinal desacoplado(azul).....47
Figura 35: Sinal FM completamente filtrado.....48
Figura 36: Estimativa do tempo de propagação.....48
Figura 37: Sinal composto em amarelo e sinal de alimentação filtrado em azul.....49
Figura 38: Terminal serial recebendo informações que serão enviadas pela CAN.....50
Figura 39: Frente e verso da placa transmissora.....50
Figura 40: Frente e verso da placa receptora.....51
Figura 41: Ligação entre placa transmissora e receptora.....52
Figura 42: Projeto em funcionamento.....53
Figura 43: Painel indicando 5 mil RPM, 80 Km/h e 4ª marcha.....54
Figura 44: Painel indicando 10 mil RPM, 130 Km/h e 6ª marcha.....55
Figura 45: Rotação completamente acionada.....56
Figura 46: Circuito transmissor.....67
Figura 47: Circuito receptor primeira parte.....68
Figura 48: Circuito receptor segunda parte.....69
Figura 49: Circuito receptor terceira parte.....70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Preço do projeto.....66
Tabela 2: Lista de materiais do receptor.....71
Tabela 3: Lista de materiais do transmissor.....72

Sumário

1. Introdução 10

1.1 Objetivos 15

1.2. Organização do Texto 16

2. Fundamentação Teórica 17

2.1 Protocolo CAN 17

2.2 Injeção Eletrônica 19

2.3 *Power Line Communication* (PLC) 21

2.4 Microcontrolador Atmega328P 23

2.5 *Cyclic Redundancy Check* 23

3. Proposta do Sistema 25

3.1 Proposta de *Hardware* 25

3.2 Proposta de *Software* 33

4. Resultados e Discussão 41

5. Conclusões 58

Referências Bibliográficas 61

APÊNDICE A - Discriminação de Preços 66

APÊNDICE B - Circuitos Elétricos 67

APÊNDICE C - Listas de Materiais 71

1. Introdução

A *Society of Automotive Engineers* (SAE) iniciou o projeto Fórmula SAE oficialmente em 1979, com o objetivo de criar uma competição de carros de corrida desenvolvidos por alunos, ainda na graduação. Mais especificamente, a ideia era criar uma competição como a já existente na Fórmula 1, só que deveria ser realizada apenas com projetos de carros idealizados e executados por alunos de universidades (SAE, 2014). Para nortear o projeto, a então recentemente criada organização SAE, decidiu participar como mediadora do processo e jurada dos projetos, estabelecendo regras de como seria a competição e quais diretrizes os projetos deveriam seguir. As diretrizes a serem seguidas pelos projetistas contavam com itens como: a potência máxima do motor, itens básicos de segurança, especificações estruturais mínimas do carro e etc. Dentre as várias diretrizes criadas, estabeleceram-se algumas divisões do projeto em áreas de atuação distintas, definindo-se quais as responsabilidades de cada área. Uma destas áreas criadas foi a Eletrônica. Na Figura 1 apresenta-se todas equipes em uma competição ocorrida em 2019, ela ilustra quantas pessoas se envolvem no projeto Fórmula SAE, e o trabalho que é desenvolvido no projeto.

Figura 1: Competição Fórmula SAE em Michigan, 2019

Fonte: Society of Automotive Engineers (2021)

A Eletrônica é a área responsável por qualquer sistema elétrico existente no carro, e também é responsável por elaborar meios de sensoriamento e instrumentação do carro, a fim de monitorar o comportamento dinâmico do mesmo nas pistas. Um dos sistemas mais basais de monitoramento da dinâmica do carro, e que é responsabilidade da Eletrônica, é o painel do carro. Um bom painel deve ser claro e resumido, dando as informações estritamente necessárias para uma pilotagem segura por parte do piloto. O painel é responsável por apresentar ao piloto as condições dinâmicas instantâneas do carro e serve para auxiliar na pilotagem. Na Figura 2 apresenta-se o painel de um carro convencional, para ilustrar algumas das informações que podem haver em painéis de carro. (SEGERS, 2014)

Figura 2: Painel de um carro popular

Fonte: Motor Show (2015)

Para este sistema fez-se um levantamento com os pilotos da equipe Fênix Racing de Fórmula SAE da UNESP de Ilha Solteira, e também de prós e contras. Após esta análise, decidiu-se criar um painel com apenas o tacômetro, velocímetro e indicação de marcha. Estes parâmetros são necessários e suficientes para uma pilotagem arrojada e com segurança do carro (MILLIKEN; MILLIKEN, 1995), por isto são importantes de serem monitorados, tanto pelo piloto do carro quanto pela equipe (SEGERS, 2014). Após definidos os parâmetros,

então é necessário entendê-los e definir como serão mensurados no carro, como esta informação mensurada será transmitida ao painel, e como será a visualização destas no painel.

O tacômetro faz parte do sistema capaz de apresentar as rotações por minuto (RPM) do motor. Este sistema é fundamental para um piloto, pois através dele é possível compreender como a dinâmica do carro está no momento, e junto com a informação da marcha, é possível ter uma noção de quanta inércia o carro possui no momento, qual manobra é possível fazer nesta condição que ele se encontra, etc. O tacômetro implementado no sistema do fórmula faz uso de um sensor Hall acoplado a uma roda fônica, que por sua vez é acoplada no eixo do motor. Desta forma, quando o eixo do motor roda, gira junto a roda fônica, e com esta rotação o sensor Hall é capaz de medir a rotação. Um esquema de sensor Hall aplicado na contagem de pulsos é apresentado na Figura 3.

Figura 3: Sistema roda fônica mais sensor HALL

Fonte: Vagner Silva (2013)

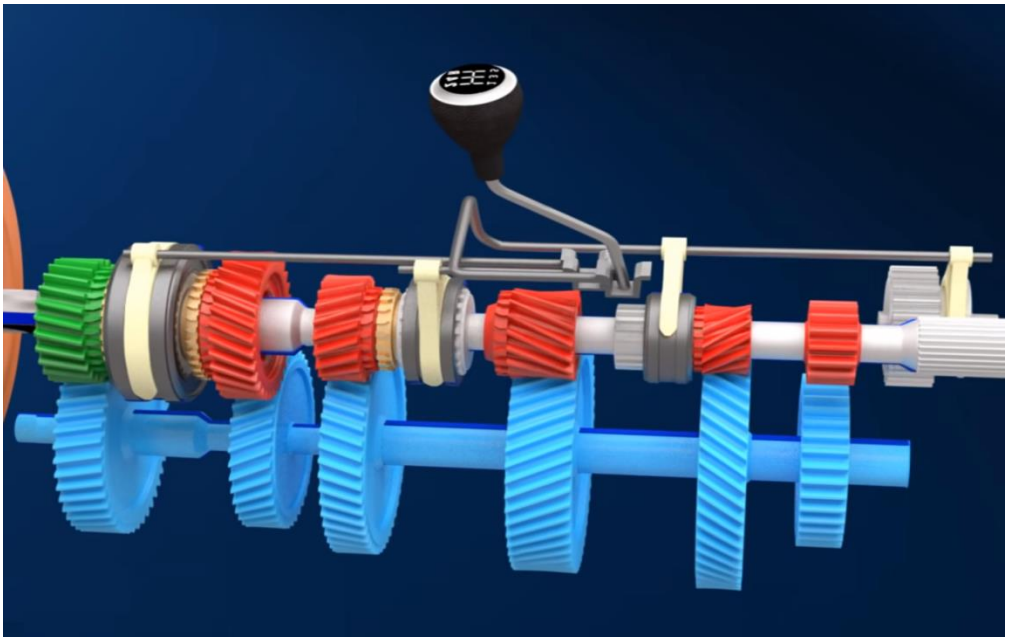
O sensor HALL leva este nome por uma menção direta ao efeito Hall, efeito nomeado assim em homenagem ao físico Edwin Hall. Este realizou experimentos com placas de condutores para analisar a influência que os campos magnéticos tem sobre a cargas elétricas

em movimento. Hall observou que sob a presença de campo magnético, um fio atravessado por corrente elétrica acumula cargas nas paredes do condutor. Segundo Bohorquez (2015, p. 17) "[...] estas cargas geram um campo elétrico perpendicular à direção da corrente, gerando uma força elétrica de magnitude igual, porém contrária à força magnética. O resultado do campo elétrico é um potencial elétrico mensurável, conhecido como tensão Hall[...]".

O sensor hall é capaz de interagir com a roda fônica, que é metálica, esta interação altera o campo magnético do sensor, que por fim, altera a tensão Hall gerada. A tensão Hall gerada é que serve de base para reconhecer a rotação da roda fônica. A tensão Hall neste sistema é uma onda quadrada que muda em frequência de acordo com o RPM do motor. O modo que se calcula a RPM do motor é mensurando a frequência que o sensor Hall gera, o resultado, total de pulsos ocorridos, é dividido pelo número de dentes da roda fônica, e executando este procedimento obtém-se o valor da rotação do motor.

O sensor de velocidade tem exatamente o mesmo princípio, porém a roda fônica está após o câmbio (conjunto das marchas), já medindo a velocidade final do carro. A marcha é adquirida através de uma divisão simples entre a rotação e a velocidade. Isto ocorre pois a relação sempre é constante para uma mesma marcha, e como o conjunto de engrenagens para cada marcha é sempre fixo, a relação do RPM do motor, pela rotação de saída (velocidade final) sempre vai dar uma constante que indica qual marcha o carro está. Na Figura 4 apresenta-se um câmbio de carro.

Figura 4: Câmbio representando as relações fixas das marchas



Fonte: Sabin Mathew (2017)

A relação é simples porém não é necessário atenção a todos os detalhes, pois a injeção eletrônica instalada no carro mede todos estes dados, analisa e nos entrega valores já calculados.

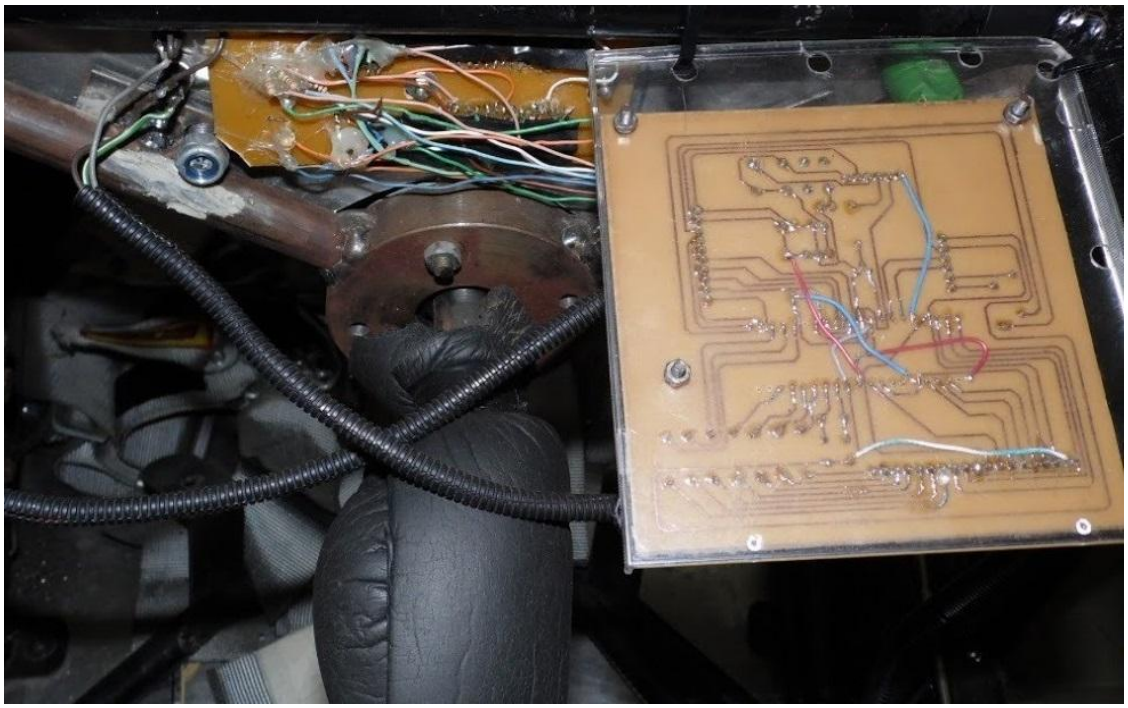
Toda esta metodologia já foi desenvolvida, testada e estabelecida como apropriada pela equipe há alguns anos, outros painéis foram construídos desta forma e apresentaram um comportamento satisfatório. Na Figura 5 apresenta-se um painel construído em 2015 que já utilizava toda esta metodologia.

Figura 5: Apresentação do painel ao piloto

Fonte: Próprio Autor

O grande avanço da proposta deste trabalho está na parte não aparente aos usuários, pois, para um painel deste funcionar, era necessário usar cerca de 25 fios do controlador até o painel, pois muitos LEDs são usados para apresentar as informações ao piloto. Na Figura 6 apresenta-se como é a vista da parte traseira do circuito.

Figura 6: Placas e fios necessários ao funcionamento do painel



Fonte: Próprio Autor

1.1 Objetivos

O objetivo deste trabalho é desenvolver um método de transmissão de informação serial que se integre junto à alimentação. Os painéis já desenvolvidos no Fórmula foram de comunicação paralela, utilizando muitos fios. O painel deste trabalho está utilizando comunicação serial, e além disto está unindo os sinais de alimentação e comunicação em apenas dois fios.

Na proposta deste trabalho o painel receberá os dados e a alimentação por dois fios, eliminando os vinte e cinco fios anteriormente necessários. Como já comentado anteriormente, a própria injeção eletrônica do carro fornece estes dados via protocolo *Controller Area Network* (CAN). A proposta é coletar este sinal CAN, retirar a informação desejada, integrá-la junto à alimentação, e transmitir este conjunto de dados utilizando apenas dois fios. Em um segundo circuito ocorre a recepção deste sinal, este circuito deve separar um sinal do outro e, por fim, apresentar no painel estes dados. Para criar este projeto é necessário previamente conhecer o protocolo CAN e a tecnologia *Power Line Communication* (PLC), que será a tecnologia que norteará o desenvolvimento deste trabalho.

1.2. Organização do Texto

Na seção 2 são abordados os fundamentos teóricos para embasar a compreensão do projeto proposto. É necessário a apresentação do protocolo CAN, e os fundamentos do PLC, que é o sistema de comunicação aplicado, como o PLC usa princípios de Frequência Modulada (FM), este princípio também é abordado, o microcontrolador Atmega328P e algumas de suas características úteis ao projeto por fim são apresentados.

Na seção 3 visa-se um aprofundamento de toda a solução proposta, cada decisão tomada, cada circuito elaborado, todo detalhe da solução é justificada e explicada nessa seção. Os métodos adotados para transmissão e recepção da informação são abordados, a forma como a alimentação é condicionada e filtrada também são apresentados.

Na seção 4 são apresentados os resultados e discussões, como foi o desempenho de cada solução proposta na prática. Várias medições com osciloscópio são realizadas a fim de evidenciar os resultados obtidos, algumas imagens são apresentadas com o funcionamento prático do circuito.

Por fim, na seção 5, tem-se as conclusões que foram obtidas observando os resultados. Para algumas soluções são comentadas algumas discussões com melhorias possíveis, propostas de melhorias na velocidade de transmissão e economia de energia, por exemplo, são alguns dos temas abordados.

2. Fundamentação Teórica

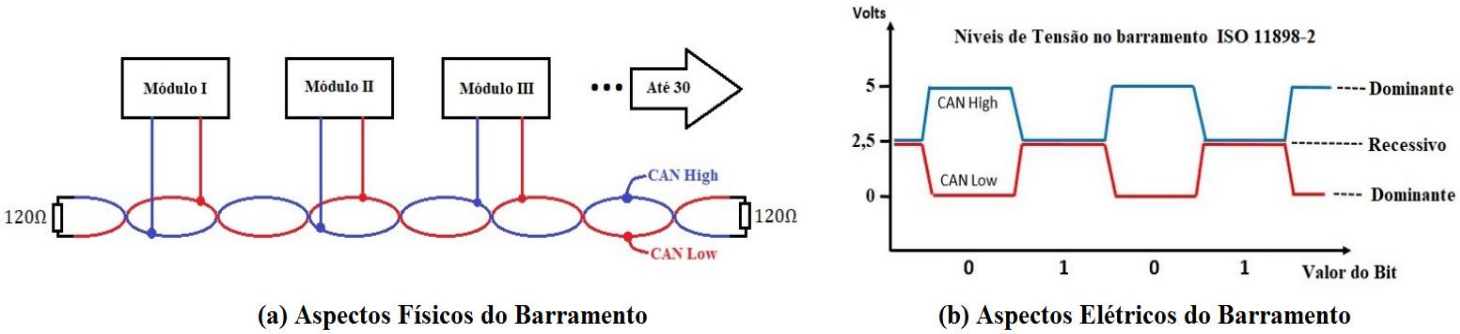
Para realização do projeto proposto, algumas tecnologias e fundamentos foram aplicados, uma introdução de cada fundamento utilizado é realizada nesta seção. O protocolo CAN, escolhido para realizar a comunicação com a injeção eletrônica, é explicado, e detalhes do hardware e do software do protocolo são comentados. A injeção eletrônica, usada neste trabalho como fonte dos dados de interesse, é mostrada, e seu funcionamento é detalhado. A tecnologia PLC, responsável por realizar a superposição do sinal de alimentação e de comunicação, é apresentada e explicada. O microcontrolador utilizado para processamento dos sinais, é descrito e suas características são comentadas. Por fim, a tecnologia de análise de erros *Cyclic Redundancy Check* (CRC), utilizada para identificar problemas na comunicação PLC, é apresentada, e o método da realização do cálculo é descrito.

2.1 Protocolo CAN

O protocolo CAN é um protocolo serial, ou seja, a transferência é feita um bit por vez. O meio físico da comunicação CAN usualmente são dois fios no arranjo de par trançado, tais fios são nomeados como CAN-H e CAN-L, e a comunicação é feita através da diferença de potencial entre estes dois fios (FERREIRA, 2009). O protocolo CAN é um dos meios utilizados para comunicação em carros, sendo ele o escolhido neste projeto por ser muito robusto contra interferências eletromagnéticas e perda de dados, além disso ele tem uma boa velocidade de transmissão para este projeto. Por ser feito por apenas duas vias de comunicação, o barramento CAN tem uma instalação muito econômica. O CAN é baseado na norma ISO 11898 e ISO 11519-2, e foi desenvolvido inicialmente por Robert Bosch para utilização em redes de comunicação serial em veículos, ele consiste basicamente de um padrão de *hardware* com diferentes tipos de campos de mensagens, regras de decisão para a transmissão de mensagens e métodos para detecção e correção de erros.(FRÖHLICH, 2008).

O protocolo CAN é separado em duas camadas: *hardware* e *software*. A camada de *hardware* define quais devem ser os níveis de tensão da rede, como estes sinais elétricos devem ser transmitidos e as especificações do meio de transmissão, como impedância, comprimento, formato da rede etc. Na Figura 7a e 7b apresentam-se detalhes da especificação de *hardware* do protocolo. (SCHUMANN; MENON, 2006)

Figura 7: Aspectos de *hardware* da rede CAN

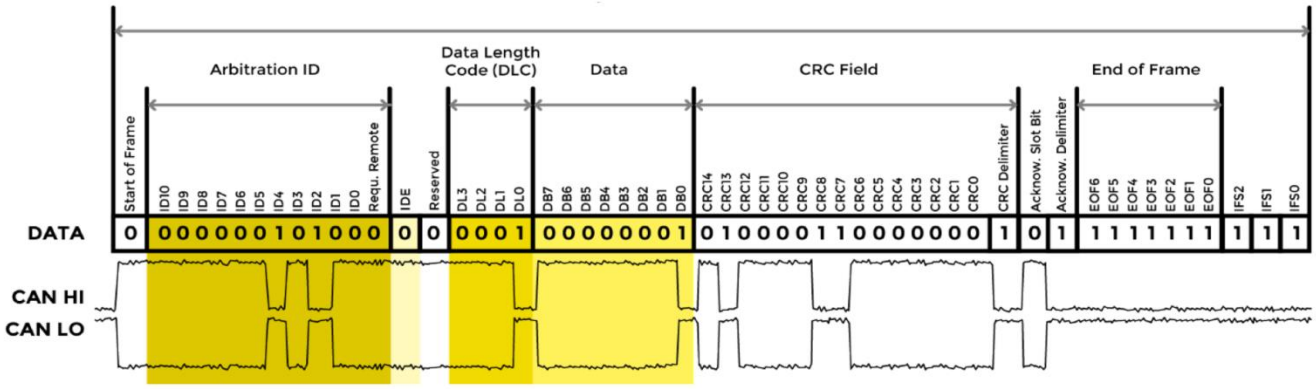


(a) Aspectos Físicos do Barramento **(b) Aspectos Elétricos do Barramento**

Fonte: Próprio autor

Chama-se *frame* uma mensagem CAN completa, e a camada de *software* especifica quais campos o *frame* da mensagem deve possuir. Dentre eles há arbitração, tamanho do pacote, os dados, campo de checagem e o fim da mensagem, sendo que cada campo será mais detalhado futuramente. A camada de *software* ainda define qual protocolo de verificação de correção de erros deve ser seguido, qual módulo tem prioridade no envio da mensagem, quais módulos podem ou não receber uma mensagem, além de outros detalhes semelhantes. Na Figura 8 apresenta-se qual a organização que um *frame* de mensagem CAN respeita, nesta figura ilustra-se todos os campos que uma mensagem possui, a posição que cada mensagem ocupa e o tamanho de cada campo. (SCHUMANN; MENON, 2006).

Figura 8: Protocolo de mensagens CAN



Fonte: Wikimedia Commons (2014)

O *frame* CAN sempre é iniciado com o envio de um bit dominante, e após este envio tem-se os campos que compõem o *frame*. Cada campo que há no *frame* de mensagem representa alguma informação, dentre os campos há alguns mais relevantes ao usuário. O

primeiro campo é chamado “*Arbitration ID*”, este se refere a um endereço de destino ao qual a mensagem é enviada, o receptor que possuir um endereço igual ao enviado aceita a mensagem. O campo chamado “*Data Length*” identifica quantos bytes de informação há no *frame* da mensagem. Um dos campos mais relevantes é o das informações trocadas de fato, sendo que os bytes neste campo são as informações que se deseja trocar. Por fim, o último campo ao qual o usuário tem acesso é o CRC, que possibilita a identificação de erros no pacote de dados. Os outros campos são usados pelo próprio protocolo, para se organizar e identificar o início e o fim da comunicação. (CUETO, 2018).

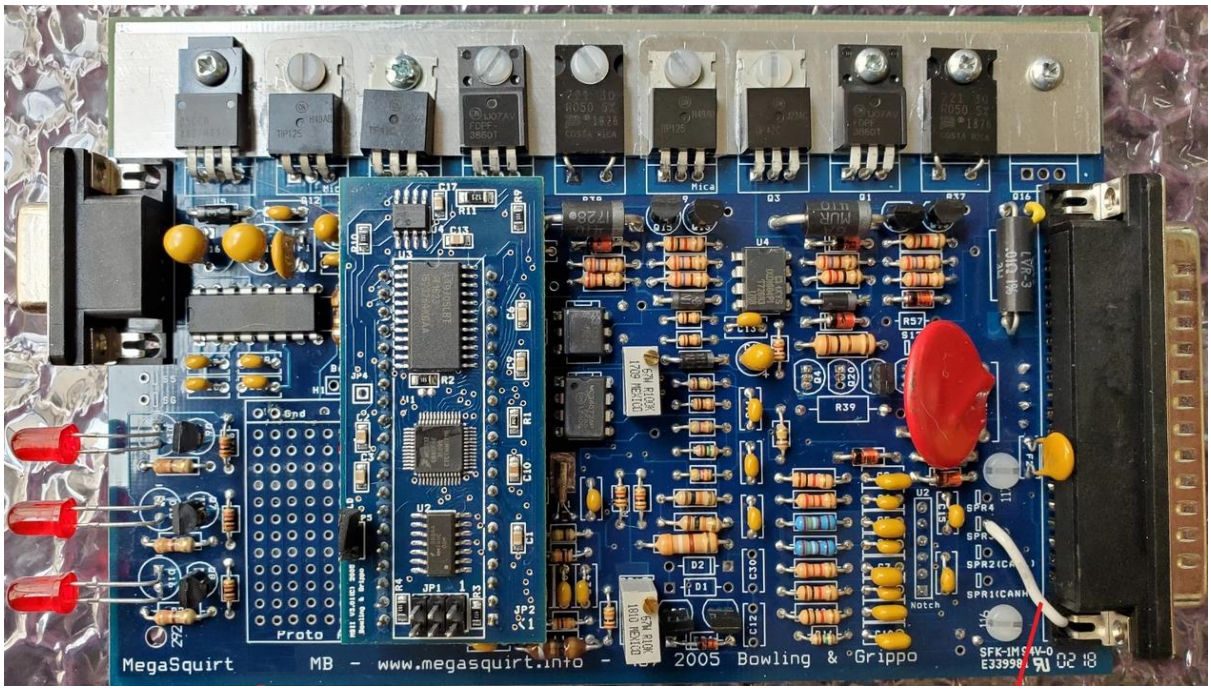
O protocolo CAN neste projeto será utilizado para receber os dados que a injeção eletrônica tem a oferecer, e que serão utilizados no painel.

2.2 Injeção Eletrônica

A injeção eletrônica, amplamente conhecida como *Engine Control Unit* (ECU), é um sistema eletrônico que desempenha o papel de controlador do motor do carro. Para executar tal tarefa a ECU precisa de acesso a uma quantidade muito grande de sensores. A ECU analisa em que estado se encontra o carro, faz isso lendo as informações dos sensores, alguns exemplos de sensores analisados são: a quantidade de ar admitido dentro do motor, a posição do virabrequim do motor, a temperatura do ar admitido, a posição do acelerador, a qualidade da gasolina, dentre outros. Com estas informações a ECU gerencia a injeção de combustível e em que momento ocorre a explosão do combustível.

As ECUs modernas possuem a capacidade de gerenciar uma quantidade massiva de dados, visando extrair a melhor relação entre parâmetros como potência do motor, economia de combustível, nível de emissões de gases nocivos além de outros mais(WILLIANS, 2018). ECUs modernas têm processadores poderosos, múltiplas entradas analógicas para ler vários sensores, e muitas saídas para controlar vários dispositivos. Na Figura 9 apresenta-se uma ECU moderna, a figura retrata a ECU pertencente à equipe Fênix Racing, e que é utilizada no desenvolvimento deste trabalho, ela foi montada pelos próprios integrantes da equipe.

Figura 9: ECU MegaSquirt MS3 internamente



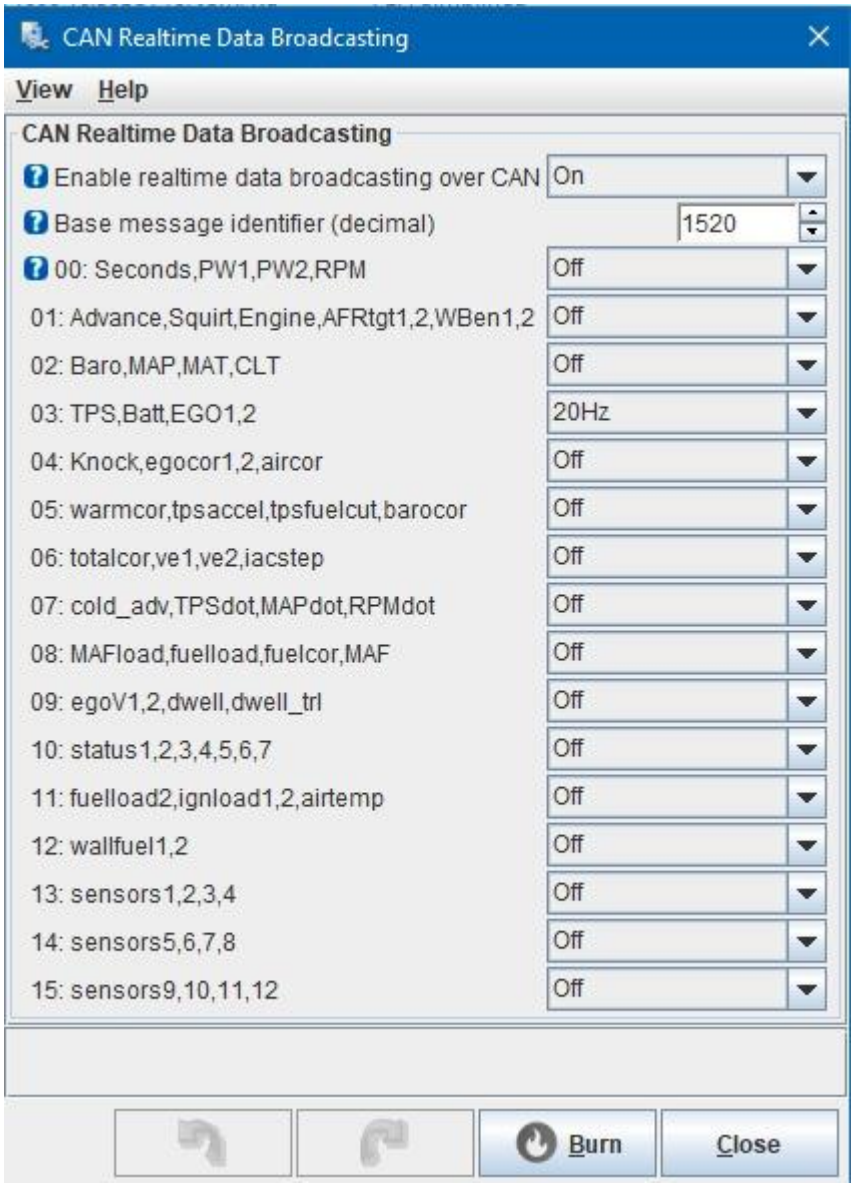
Fonte: Próprio Autor

A ECU usada no carro da equipe Fênix Racing, é um projeto desenvolvido para carros não comerciais, este projeto é aberto e se chama MegaSquirt MS3. Nesta injeção há a flexibilidade de fazer várias alterações e programações. As alterações e programações que a MegaSquirt MS3 consegue receber são realizadas por meio de um *software* de computador chamado *TunerStudioMS*, este *software* consegue realizar a comunicação com a ECU via porta USB. Através do *software TunerStudioMS* é possível gravar a ECU com programas para alterar a performance do carro dentre alguns modos diferentes, como o modo econômico ou o modo de alta performance. Outro possível programa da ECU é o controle de tração, neste programa a ECU identifica se o pneu do carro está girando em falso, e corrige esta condição. Além dos exemplos, há vários *softwares* possíveis de serem gravados, mas o que interessa para este trabalho é a requisição dos valores que a ECU lê dos sensores do carro.

A ECU lê massivamente os vários sensores que o carro possui, e geralmente as informações desses sensores são de interesse apenas da ECU. Porém, é possível que o usuário também tenha interesse em ter acesso ao valor de algum sensor, e, neste caso, a MegaSquirt MS3 possui um programa de compartilhamento de dados via protocolo CAN. Na Figura 10 mostra-se a tela de configuração para o usuário requisitar a quais sensores ele quer ter acesso. Vale ressaltar também que é possível até especificar para qual endereço os dados devem ser encaminhados e em qual velocidade os dados solicitados devem ser transferidos. No caso deste trabalho basta solicitar a opção de informação "00: Seconds,PWM1,PWM2,RPM", que

corresponde aos valores do RPM e velocidade, que são os dados necessários e que serão apresentados no painel.

Figura 10: Opções de dados que podem ser solicitados



Fonte: Próprio Autor

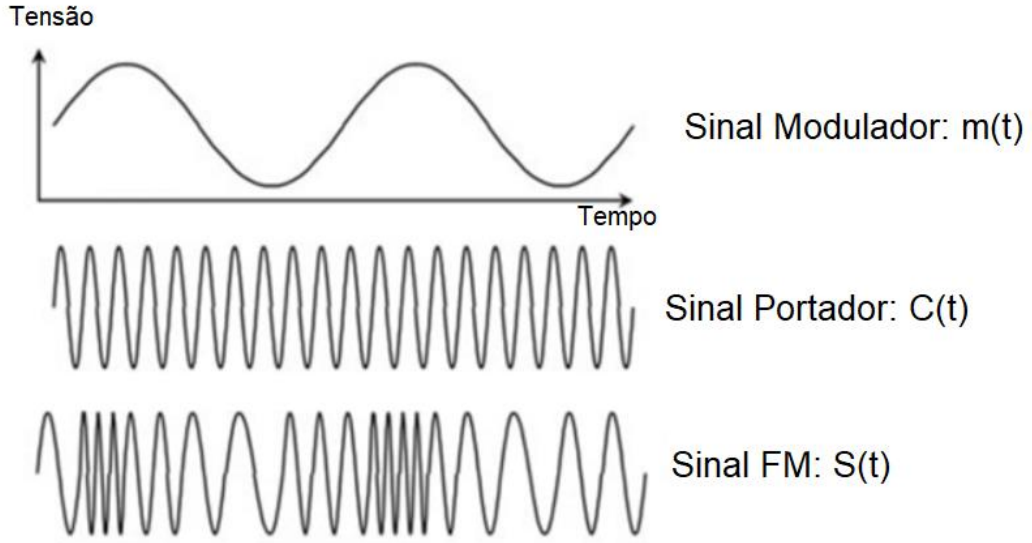
2.3 *Power Line Communication* (PLC)

Definido e entendido como serão coletados os dados do carro, fica faltando apresentar o sistema de transmissão do carro para o painel. Após a coleta dos dados, a tecnologia chamada *Power Line Communication* (PLC) será aplicada. Nesta tecnologia os sinais de

informação são enviados pela mesma rede utilizada na alimentação. A comunicação PLC é elaborada para que seja possível efetuar a superposição de um sinal de alimentação e um sinal de informação, sem que ocorra a destruição de um sinal pelo outro. Esta tecnologia pode ser exemplificada com os sistemas capazes de transmitirem o sinal de internet pela rede elétrica de uma residência. Outro exemplo de PLC são redes Smart Grids, que transmitem informação de uma estação à outra, através das linhas de transmissão.

O modo como a informação pode transitar na mesma rede da energia elétrica é efetuar a superposição dos sinais que serão transmitidos na rede: o sinal de informação, que possui baixa energia, e o sinal de energia elétrica que alimentará o circuito final (LITTLE, 2004). A transmissão de dados por meio da fiação elétrica utiliza portadoras com frequências diferentes da frequência do sinal de alimentação que já circula na rede. Vale ressaltar que o sinal de informação que circula pela rede não é uma onda de rádio, e sim um sinal de tensão e frequência variáveis, sendo possível realizar modulações neste sinal. A modulação que será aplicada neste sinal é a FM. No FM a frequência da portadora muda de acordo com um sinal modulador de entrada. O sinal de FM apresenta uma variação em sua frequência instantânea de saída de acordo com a frequência e a amplitude de um sinal modulador de entrada. Na composição dos sinais a amplitude do sinal portador permanece constante. Na Figura 11 apresenta-se como um sinal modulado em frequência variável. (FARUQUE, 2017)

Figura 11: Sinal modulador m(t) e portadora C(t), ambos compondo um sinal FM S(t)



Fonte: Saleh Faruque (2017)

2.4 Microcontrolador Atmega328P

O elemento que será capaz de controlar a frequência moduladora, e que também terá o papel de receber o sinal FM é o microcontrolador Atmega328P. Este componente exercerá a função de cérebro do projeto, por isso algumas apresentações sobre o que são microcontroladores e especificações do Atmega328 são necessárias.

Um microcontrolador pode ser definido como um pequeno computador dentro de um CI, ou seja, um microcontrolador consiste basicamente de um microprocessador e dos periféricos necessários ao seu funcionamento, como memórias, portas de entrada e saída, conversores Analógio/Digital, tudo isto dentro de um único CI. Os microcontroladores podem ser reprogramados diversas vezes e, por isso, são utilizados em uma ampla gama de aplicações. (HONÓRIO, 2018).

O Atmega328P é um microcontrolador AVR de 8 bits desenvolvido pela ATMEL, utilizado nos Arduinos mais recentes. Ele possui quatorze entradas/saídas digitais (sendo seis de PWM), seis entradas analógicas, 32Kb de Memória Flash, 2Kb de memória RAM. (SILVA, 2014). A escolha deste microcontrolador se deve por algumas de suas características de interesse no projeto, tais como a quantidade de memória, I/Os e principalmente o contador de frequência, neste projeto foi utilizado o Atmega328P em sua versão *surface mounted device* (SMD).

O contador de frequência que este microcontrolador possui, observa o sinal elétrico aplicado em seus pinos, e a cada pulso ocorrido gera um incremento em um contador interno, este mecanismo de contagem de pulsos será primordial para esta aplicação.

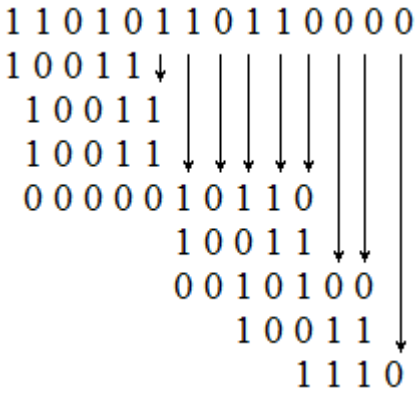
2.5 *Cyclic Redundancy Check*

O CRC é um cálculo utilizado para detecção de erros em mensagens, ele é calculado de acordo com um polinômio especificado previamente pelo usuário, o cálculo do CRC resulta em um numero chamado de *Check Sum*, este número é utilizado para saber se houve ou não erros durante a transmissão da mensagem.

É entendido como um código polinomial, uma sequência de bits utilizada como representação de um polinômio com composto apenas com os coeficientes 0 e 1. Um código polinomial de n bits é considerado a lista de coeficientes de um polinômio com n termos, variando desde x^{n-1} até x^0. O bit mais significativo é o coeficiente do elemento x^{n-1}; o

próximo bit do código polinomial é o coeficiente seguinte do polinômio, o elemento x^{n-2} , e assim sucessivamente. Por exemplo, o número binário 1110010 tem 7 bits, e representa o polinômio de sexto grau $x^6 + x^5 + x^4 + x^1$. (TANENBAUM, 2003).

Utiliza-se este polinômio para calcular sucessivas operações lógicas de ou exclusivo, entre a mensagem e o polinômio. Para isto é necessário observar se o dividendo tem maior grau que o divisor, caso esta condição seja verdadeira, as operações de ou exclusivo podem ser realizadas. A operação realizada entre dividendo e divisor através do polinômio se chama divisão em módulo 2. Um exemplo de como é calculado o CRC é dado em (1). O polinômio 11010110110000 representa o dividendo (mensagem), e o polinômio 10011 representa o divisor (polinômio do CRC), por fim 1110 é o resto da divisão em módulo 2 (*Check Sum*).



(1)

O cálculo de erros em pacotes de mensagens, é aplicado em dois momentos no projeto, na transmissão de mensagens através do barramento CAN, e na transmissão das mensagens através da comunicação PLC, proposta neste trabalho. O cálculo de CRC na mensagem CAN, é realizado automaticamente pelo CI que gerencia a comunicação, porém, o cálculo CRC nas mensagens PLC, deve ser realizado por um algoritmo no microcontrolador Atmega328P.

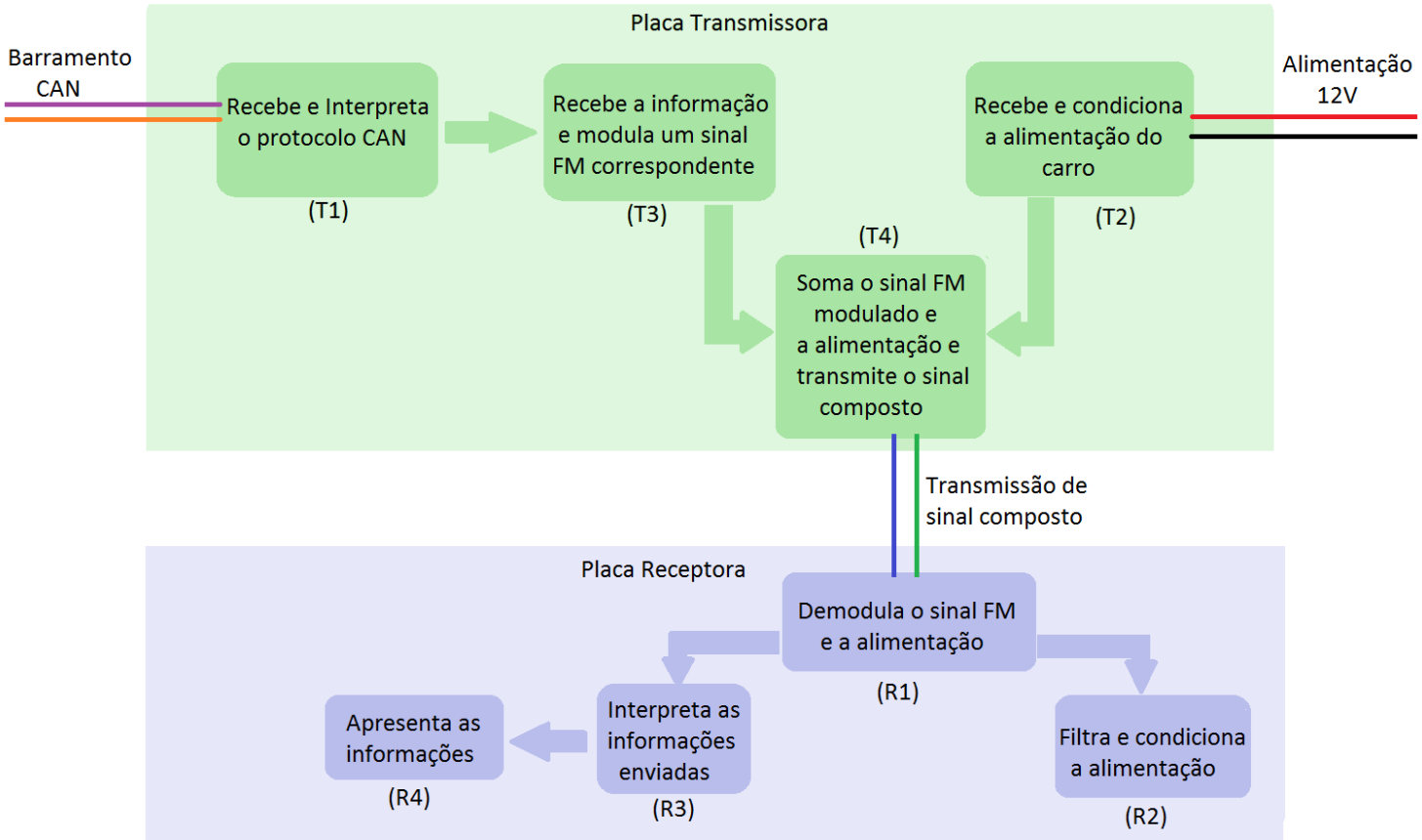
3. Proposta do Sistema

Já tendo sido estabelecido qual o objetivo do trabalho, e apresentado todas tecnologias e fundamentos utilizados, nesta seção apresenta-se a solução desenvolvida. Há uma divisão em duas partes do projeto, partes transmissora e receptora, ambas têm seus projetos detalhados. O projeto consiste em camadas de hardware e de software, ambas camadas são explicadas. Também são realizadas algumas simplificações, como fluxogramas e circuitos equivalentes, isto para ajudar na compreensão de cada detalhe da solução do projeto.

3.1 Proposta de *Hardware*

O trabalho é composto por duas placas, e inicialmente foi necessário definir como cada placa atuaria na composição do projeto final. Na Figura 12 apresenta-se um diagrama de blocos do projeto.

Figura 12: Diagrama geral do projeto



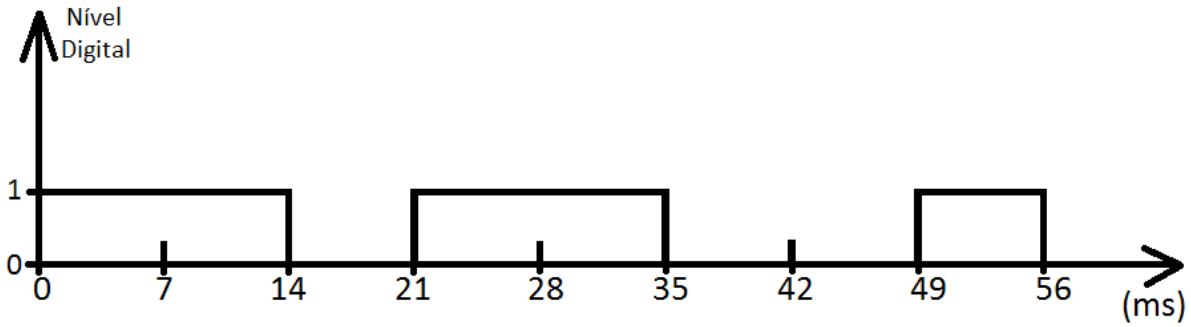
Fonte: Próprio Autor

A primeira placa, doravante denominada transmissora, precisa receber e interpretar as informações que a ECU do carro tem a oferecer. Esta placa precisa ser capaz de gerar um sinal elétrico que representa as informações recebidas, compor este sinal de informação junto ao sinal de alimentação e transmiti-los. A segunda placa, doravante chamada de receptora, precisa decompor o sinal de alimentação e o de informação, interpretar a informação recebida e apresentá-la em um painel de LEDs.

Como observado pelo diagrama, a placa transmissora precisa de uma interface com o protocolo CAN, e na imagem o bloco T1 simboliza esta necessidade. Para realizar esta interface foram escolhidos os circuitos integrados TJA1050 e o MCP2115. O circuito TJA1050 trata da camada de *hardware* discutida na introdução, ou seja, fica responsável por compatibilizar a impedância da rede, enviar os sinais elétricos nas especificações definidas, e receber os sinais do carro. O circuito MCP2515 trata da camada de *software*, e fica responsável por interpretar os dados recebidos, enviar o bit de *Acknowledge*, calcular o CRC etc.

Os dados recebidos e armazenados pela comunicação CAN serão lidos pelo microcontrolador Atmega328P, que ficará responsável por gerar o sinal modulador. A informação modulada é enviada de forma serial e cada bit desta transmissão dura um período de 7 milisegundos. Na Figura 13 apresenta-se o sinal modulador, nota-se que a informação enviada é um byte de valor binário 11011001 (decimal 217).

Figura 13: Formato do sinal modulador

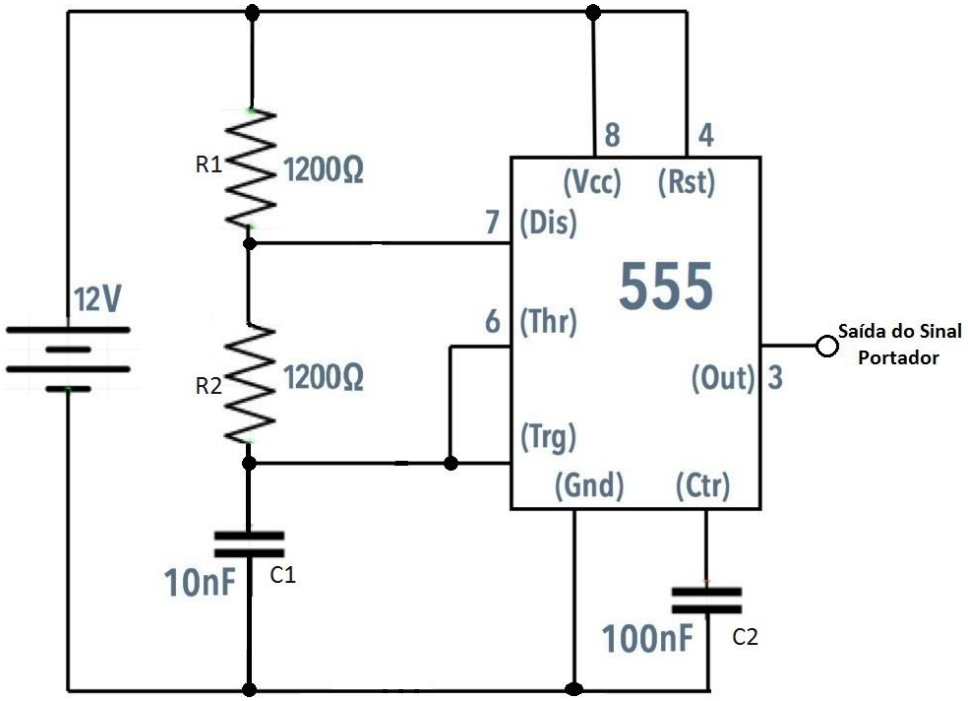


Fonte: Próprio Autor

O sinal modulador é gerado pelo microcontrolador e é utilizado como entrada de um circuito capaz de modular em frequência uma onda portadora. O sinal portador é gerado por um CI 555, utilizado em um modo chamado astável. Neste modo o CI gera um ciclo de ondas

quadradas com frequência controlada por um capacitor e um resistor. Na Figura 14 apresenta-se o circuito gerador da onda quadrada portadora.

Figura 14: Gerador do sinal portador de onda quadrada



Fonte: Próprio Autor

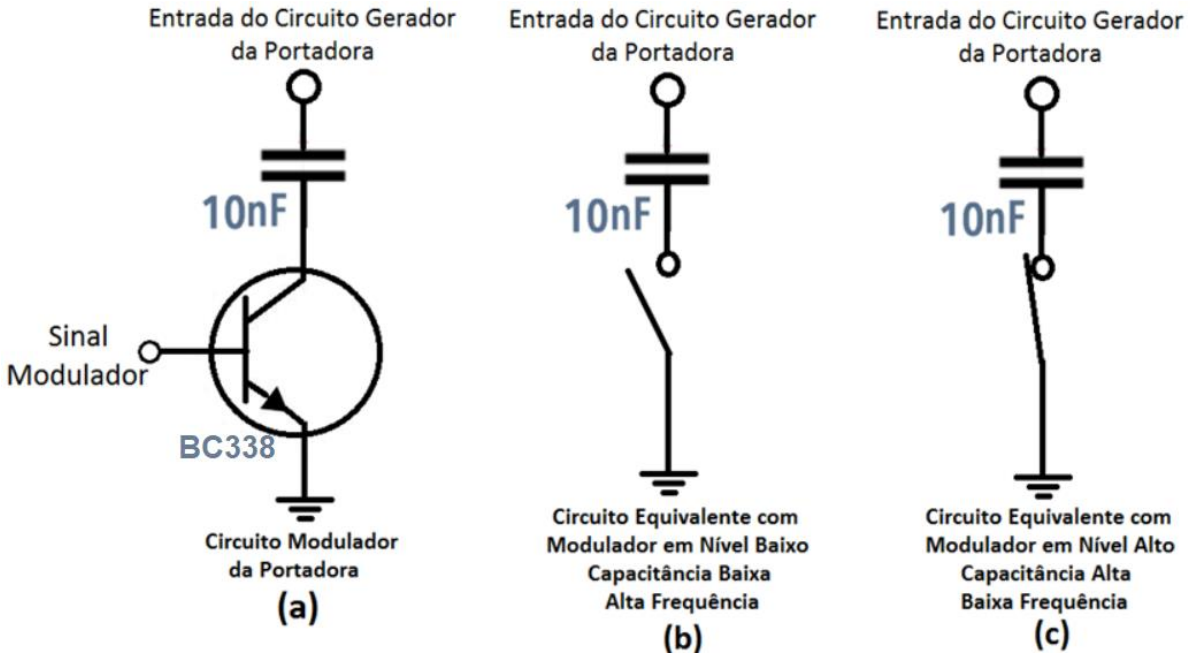
O circuito da Figura 14 gera ondas quadradas com frequência dada por (2), esta é a fórmula do CI 555 no modo astável.

$$f = \frac{1}{\ln 2 * C_1 * (R_1 + 2R_2)} \qquad (2)$$

Substituindo os valores pelos apresentados no circuito da Figura 14, têm-se que o valor resultante é 40.074 Hz, esta é a frequência natural do circuito, sem a interferência do sinal modulador, esta frequência calculada é a definida como a alta frequência do FM. Como se trata de uma transmissão FM, novas frequências serão inseridas no circuito. Para entender o surgimento destas frequências e calcular seus valores, o mecanismo de modulação da portadora deve ser apresentado. A mudança de frequência está relacionada ao capacitor C1 do circuito da Figura 14. Este capacitor é o responsável pela geração do sinal portador, e o ciclo de carga e descarga do capacitor C1, controlado pelos resistores R1 e R2, estes componentes regem a temporização do circuito.

O sinal modulador gerado pelo Atmega328P será utilizado para alterar a capacitância que controla a frequência do 555, com esta alteração a frequência do sinal do 555 será modulada seguindo a informação emitida pelo Atmega328P. Na Figura 15a apresenta-se o esquema elétrico capaz de alterar a capacitância sentida pelo 555, a Figura 15b e 15c apresentam os dois estados equivalentes do circuito. Na Figura 15b apresenta-se um estado reduzido de capacitância, gerando uma alta frequência, enquanto que na Figura 15c apresenta-se um estado de alta capacitância, fazendo assim com que a frequência de saída fique baixa.

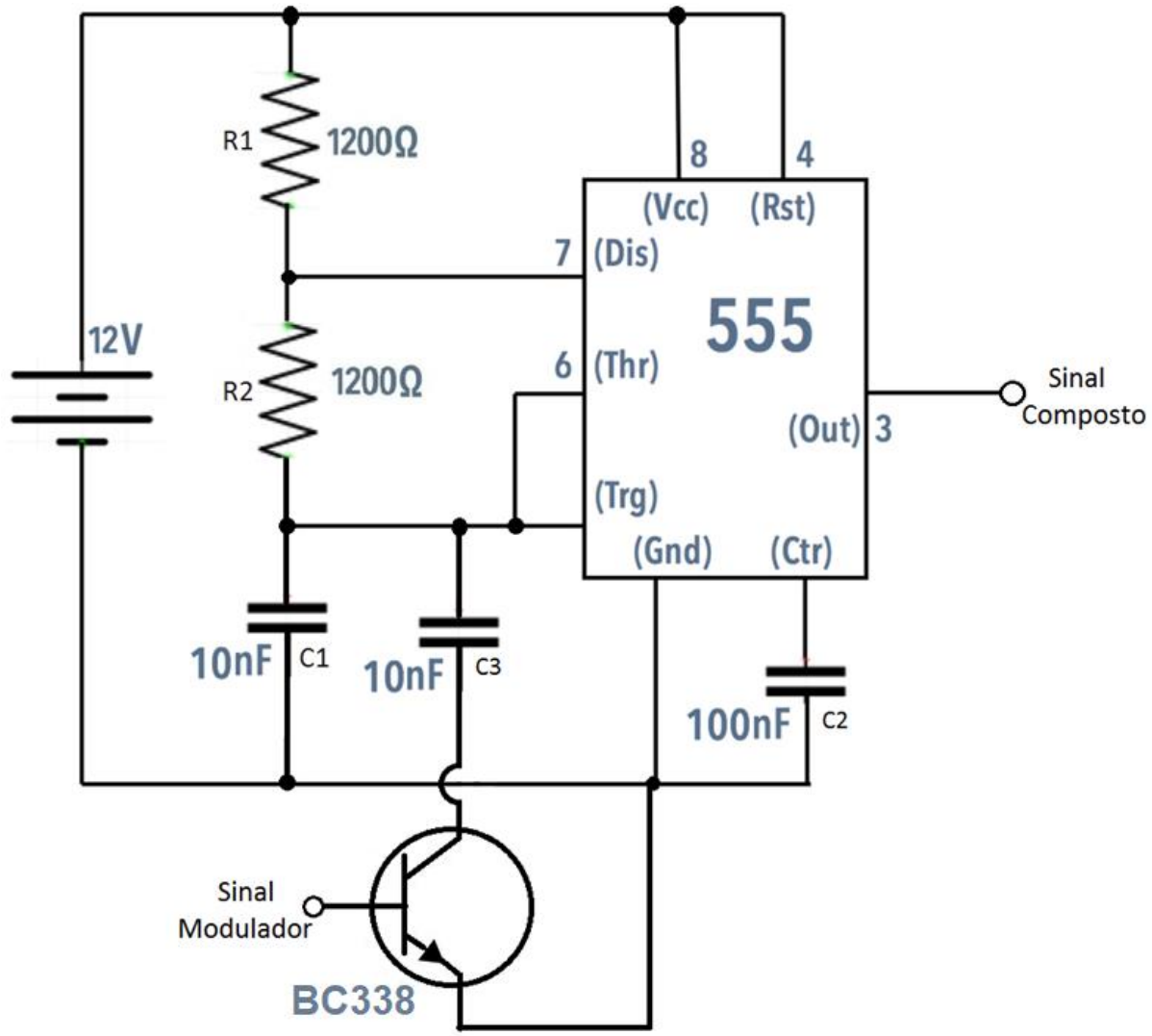
Figura 15: Circuito controlador de capacitância



Fonte: Próprio Autor

O circuito da Figura 14 e o da Figura 15a são agrupados, e juntos formam o circuito que modula o sinal portador seguindo as oscilações do sinal modulador. A junção destes circuitos é mostrada na Figura 16, na qual se apresenta o circuito gerador do sinal portador, porém, nota-se a adição de um capacitor C3. Este capacitor é chaveado pelo sinal modulador, e no processo de chaveamento ele altera a capacitância total adicionando ou retirando a contribuição de C3, alterando assim a frequência do CI 555.

Figura 16: Circuito modulador de frequência completo



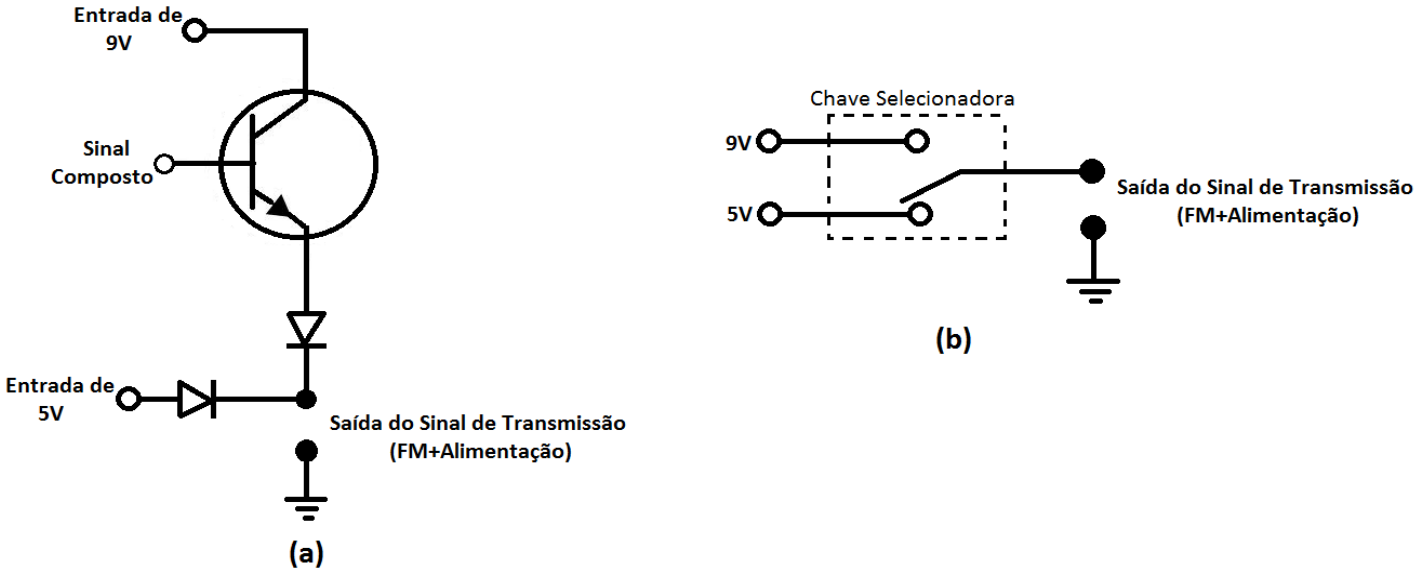
Fonte: Próprio Autor

Nota-se que há duas frequências principais no circuito, uma sem a contribuição de C3 para a capacitância total, outra com tal contribuição. A frequência 40.074 é a frequência sem a contribuição de C3, já a frequência definida como baixa, que é computada com a contribuição de C3, é dada pela equação (2) substituindo C1 por C1+C3. O resultado da frequência com a contribuição de C3 é 20.037 Hz, e é definido como baixa frequência. Este sinal representado pela frequência baixa e alta é o sinal composto FM, que será utilizado para transmitir as informações.

Junto ao sinal de informação deve-se sobrepor o sinal da alimentação, o que é feito pelo circuito da Figura 17a. Este circuito é capaz de selecionar entre 2 níveis de tensão qual alimentação é aplicada na saída, sendo que este chaveamento é um reflexo do sinal composto

mais um nível DC. Na Figura 17b mostra-se uma representação equivalente com uma chave selecionadora, que torna mais compreensível o processo que cria o sinal de transmissão.

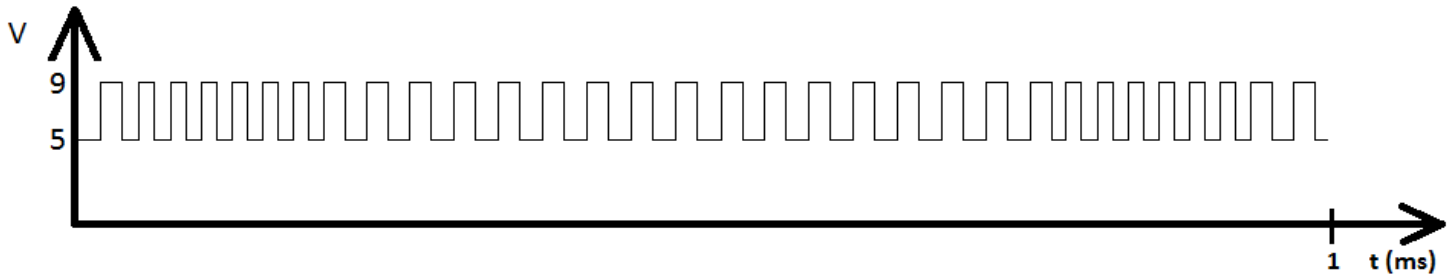
Figura 17: Circuito somador de sinais



Fonte: Próprio Autor

Na Figura 18 apresenta-se o formato do sinal de saída, no qual o sinal é composto por um nível DC de no mínimo 5 volts e uma onda quadrada FM que oscila entre 9 volts e o piso de 5 volts.

Figura 18: Formato do Sinal de Transmissão

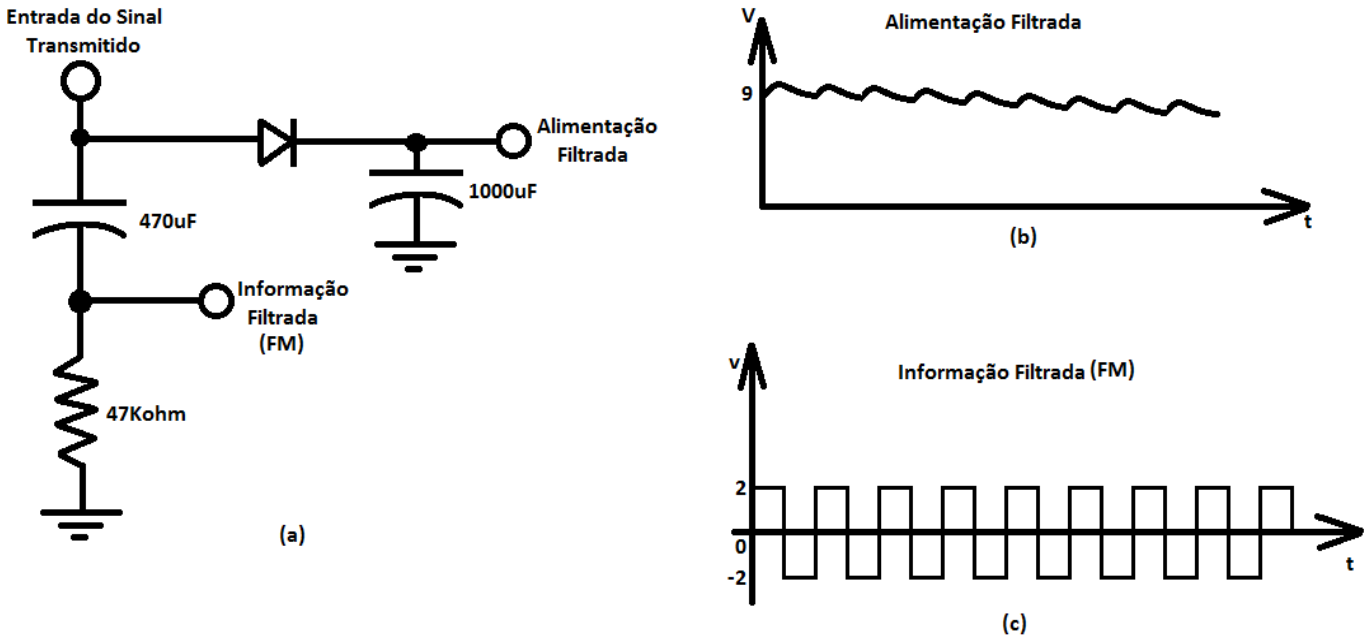


Fonte: Próprio Autor

Todo este ciclo explicado até o momento é feito pela placa transmissora, e este sinal deve ser recebido pela placa receptora e decomposto. O sinal DC de 5 volts deve ser usado para alimentação da placa receptora, e o sinal FM deve ser condicionado e interpretado para que as informações sejam recebidas. A primeira etapa é separar a alimentação DC do sinal FM, o que é feito por um filtro RC. No filtro RC o sinal DC é armazenado totalmente no

capacitor, e o resistor fica com a parcela variável do sinal. Na Figura 19a apresenta-se o circuito filtro, e nas Figuras 19b e 19c apresentam-se os gráficos dos sinais filtrados.

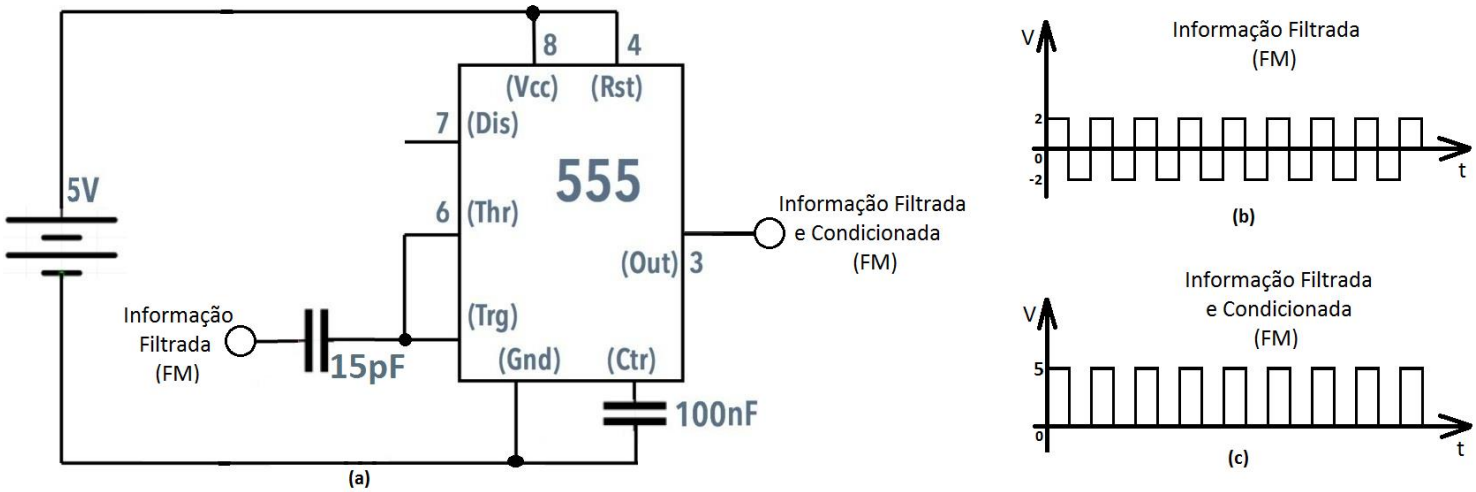
Figura 19: (a)Circuito filtro; (b)Alimentação filtrada; (c)Informação filtrada



Fonte: Próprio Autor

Da separação de sinais apresentada na Figura 19, nota-se que a informação filtrada FM ainda não é apropriada para uso no microcontrolador 328P. Para a correta identificação, o sinal FM deve variar entre 0V e 5V, e um circuito condicionador então deve ser acrescentado para o correto nivelamento do sinal. Para a função de condicionador utiliza-se um CI 555, neste uso o CI percebe as variações da informação filtrada e replica este sinal em sua saída, e como a saída fica limitada pela alimentação do CI, neste caso 5 volts, a réplica da informação filtrada passa a variar entre 0V e 5V. Na Figura 20a apresenta-se o circuito que realiza este processo, na Figura 20b apresenta-se o sinal FM pré CI 555, e a Figura 20c o sinal FM que o CI 555 emite.

Figura 20: (a)Circuito condicionador; (b)Sinal de informação original; (c)Sinal condicionado

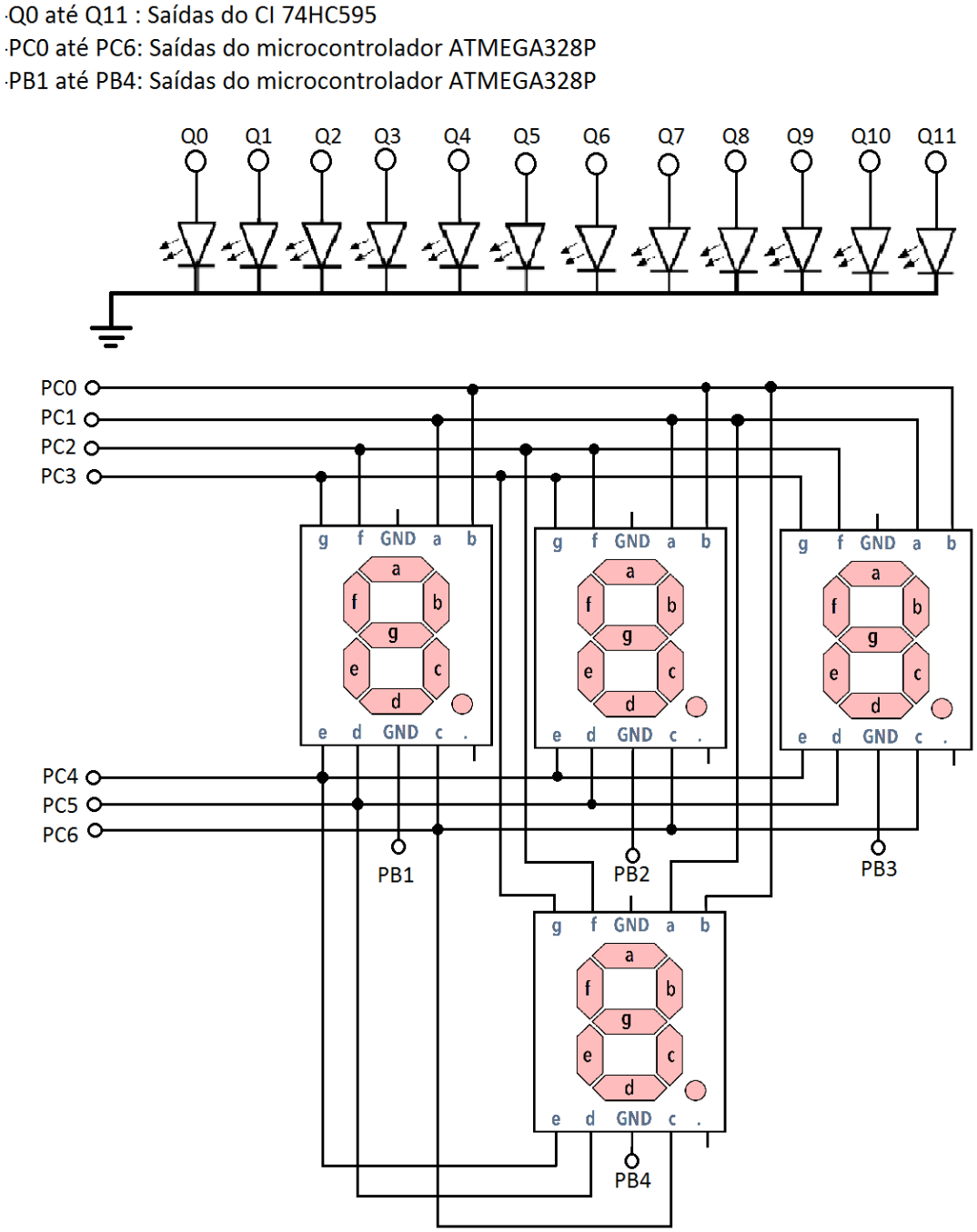


Fonte: Próprio Autor

A tensão de alimentação após a filtragem também é inapropriada para alimentar o circuito receptor, pois para isto é necessário uma tensão constante de 5 volts. Além disso, há um pequeno *ripple* que deve ser extinto para que a tensão fique apropriada para o uso. Para estabilização da tensão em 5 volts usou-se o CI Lm7805. Com ele a tensão fica dentro das especificações, estável em 5 volts.

Todo o restante da placa de recepção é o circuito do mostrador, onde o piloto visualiza as informações, este é apresentado na Figura 21.

Figura 21: Representação do painel mostrador



Fonte: Próprio Autor

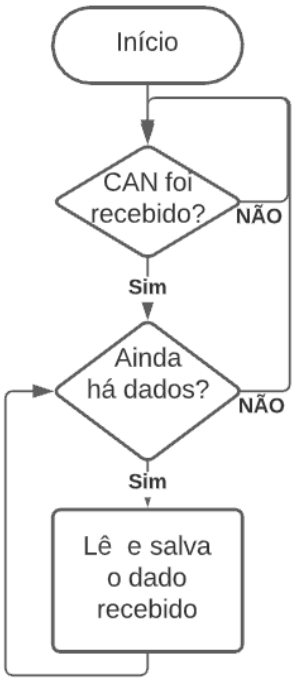
3.2 Proposta de *Software*

Até o momento descreveu-se o *hardware* do projeto, porém, há outra parte de igual importância, que é o firmware. No projeto do transmissor o firmware será responsável por ler as informações que a injeção eletrônica do carro tem a oferecer, e criar a informação serial que será o sinal modulador. No receptor, o firmware deve receber o sinal filtrado e

condicionado e deve interpretá-lo, e após isto deve acionar os displays e LEDs para apresentar as informações recebidas. Todo o firmware se baseou na plataforma de programação Arduino e em sua interface de programação.

A primeira função importante do firmware é receber o que a injeção eletrônica têm a entregar, e esta informação chega via protocolo CAN. Como é utilizado o CI MCP2515, que lida direto com o protocolo CAN e decodifica toda mensagem recebida, resta ao firmware apenas verificar no CI se algo foi recebido. Caso isso ocorra, então deve-se requisitar a transferência. Para simplificação utilizou-se uma biblioteca do Arduino chamada CAN.h, do desenvolvedor Sandeep Mistry, esta biblioteca torna muito fácil lidar com os pacotes que o MCP2515 recebe. Na Figura 22a apresenta-se o fluxograma sobre a lógica utilizada e 22b apresenta o trecho de código capaz de receber as informações do protocolo CAN.

Figura 22: Fluxograma e código do responsável por receber pacotes CAN na placa receptora



(a)

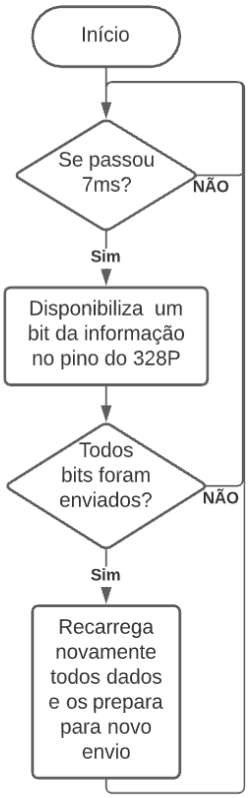
```
17  packetSize = CAN.parsePacket();
18  if (packetSize)
19  {
20    while (CAN.available())
21    {
22      value_rpm = CAN.read();
23      value_speed = CAN.read();
24      value_march = CAN.read();
25    }
26  }
```

(b)

Fonte: Próprio Autor

Com os dados recebidos é necessário transformá-los em informação serial com período de 7 milissegundos por bit, para este sinal servir de modulador. Para esta lógica utiliza-se um relógio contador de microssegundos. Conta-se a passagem de 7000 microssegundos, e a cada passagem deste período um bit da informação total é disponibilizado no pino do Atmega328P, e neste pino então o sinal modulador é gerado. Na Figura 23a apresenta-se o fluxograma da geração do sinal modulador, e em 23b apresenta-se o código que gera o sinal modulador.

Figura 23: Processo de serialização dos dados



(a)

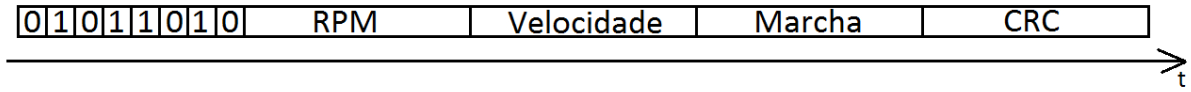
```
time_now = micros();
if( (time_now - time_past) > 7000)
{
  put_data_on_pin((atual&0x8000000000) >> 39);
  atual = atual << 1;
  referencia = referencia >> 1;
  if(referencia == 0)
  {
    referencia = 0x10000000000;
    buffer_crc_transmiter[0] = 0x5a;
    buffer_crc_transmiter[1] = value_rpm;
    buffer_crc_transmiter[2] = value_speed;
    buffer_crc_transmiter[3] = value_march;
    transmiter_crc.restart();
    transmiter_crc.add(buffer_crc_transmiter, 4);
    buffer_crc_transmiter[4] = transmiter_crc.getCRC();
    atual = (0x5a00000000) | (value_rpm * 16777216) | (value_speed * 65536) | (value_march * 256) | buffer_crc_transmiter[4];
  }
  time_past = time_now;
}
```

(b)

Fonte: Próprio Autor

Os dados disponibilizados são um cabeçalho para identificação da transmissão, RPM, velocidade, marcha e o CRC, esta sequência de campos ajuda a identificar se dados foram recebidos, e na compreensão da integridade do que foi recebido pelo receptor. Caso o CRC calculado no receptor não coincida com o que chegou no pacote, isto indica que algum erro ocorreu na transmissão e este pacote todo é descartado. O CRC é calculado usando uma biblioteca que se chama CRC.h, ela foi criada pelo desenvolvedor Rob Tillaart . Esta biblioteca foi escolhida por sua simplicidade, isto coloca o foco no desenvolvimento do trabalho, e não em reproduzir códigos já estabelecidos. O cabeçalho utilizado é o binário 01011010 (hexadecimal 5A) e o polinômio escolhido para cálculo do CRC foi $\boldsymbol{x^2 + x + 1}$. As informações são transmitidas na ordem fixa, RPM, velocidade, marcha. O *frame* montado com estes dados é apresentado na Figura 24.

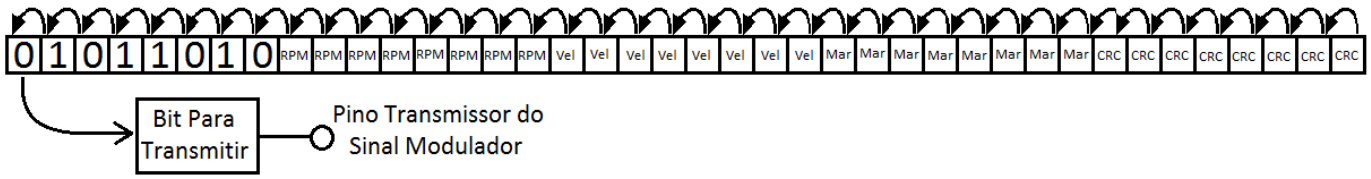
Figura 24: Formato dos campos de dados



Fonte: Próprio Autor

Os dados do *frame* são transmitidos para o pino do sinal modulador através de shifts para a esquerda, como mostrado na Figura 25.

Figura 25: Modo de formação do sinal modulador



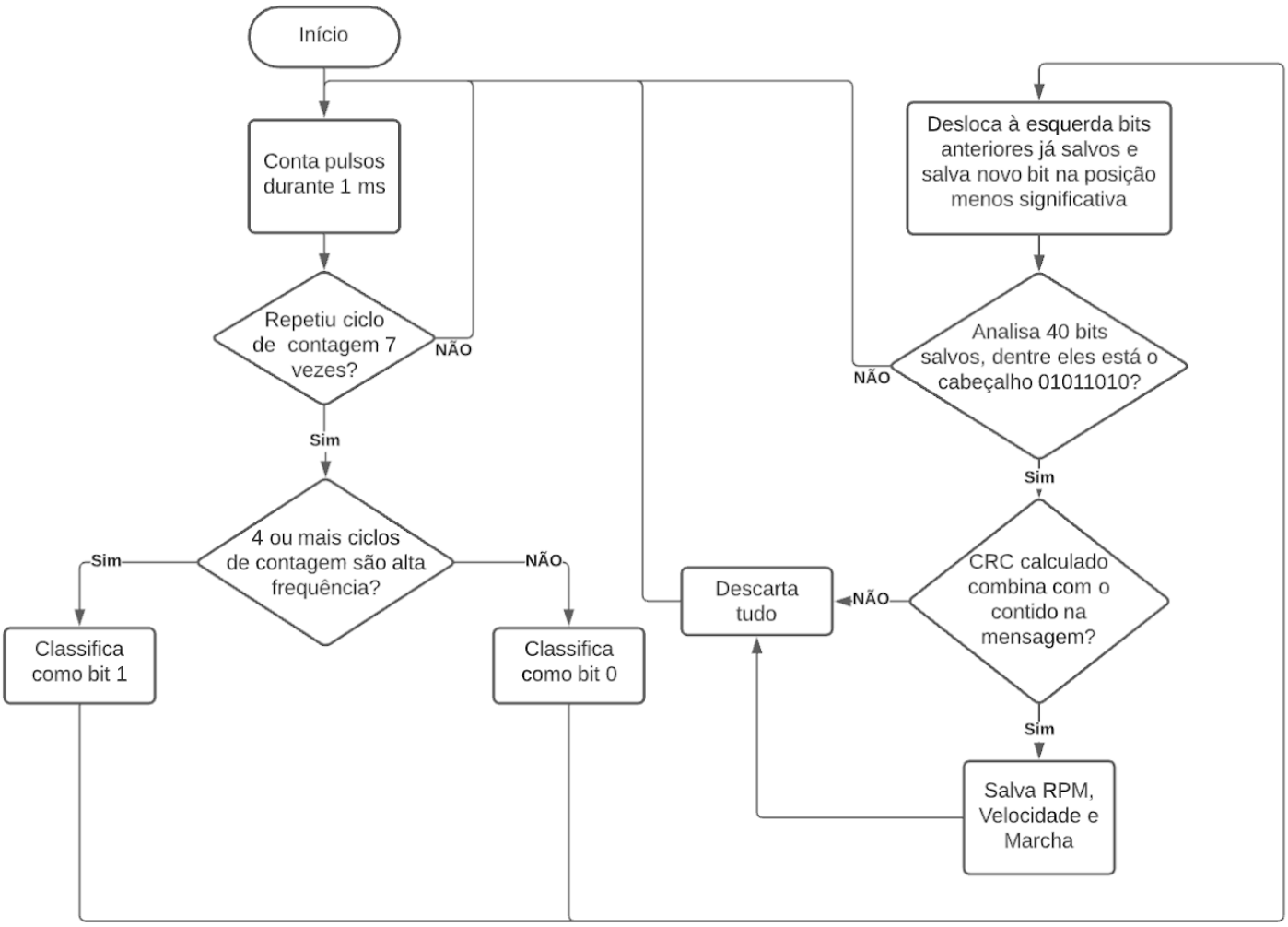
Fonte: Próprio Autor

Estes dados enviados são recebidos pela placa receptora e um algoritmo reconhece tais dados para apresentá-los no painel. O algoritmo que reconhece os dados se trata de um filtro lógico. Este filtro consiste em uma contagem de pulsos pelo período de 1 milissegundo. Passado este período de coleta, o algoritmo identifica quantos pulsos ocorreram. Caso ocorra um número maior que 32 pulsos, o algoritmo classifica como alta frequência e interpreta como nível lógico 1. Caso neste período tenha ocorrido um número menor que 32 pulsos, o algoritmo identifica como baixa frequência e classifica como nível lógico 0. Este processo é

repetido sete vezes, para que se confirmem múltiplas vezes qual valor foi lido, e a interpretação seja indubitável. Este processo é realizado através de um timer no microcontrolador 328P e pelo contador de pulsos. Para a utilização destes dois periféricos basta configurá-los de modo apropriado e todo processo de contagem de tempo e de pulsos é feito automaticamente. Para utilização destes periféricos foram incluídas bibliotecas que fazem esta configuração automaticamente, o que torna mais fácil a utilização. A biblioteca utilizada se chama FreqCount.h, e foi criada pelo desenvolvedor PaulStoffregen.

A placa receptora executa o algoritmo de identificação da informação conforme o fluxograma da Figura 26(a), e na Figura 26(b) apresenta-se o código que executa esta tarefa.

Figura 26: Fluxograma e código do filtro



(a)

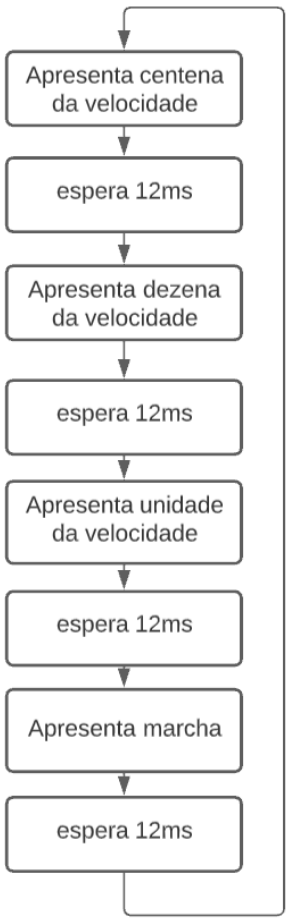
```
52  if (FreqCount.available() == 1)
53  {
54    counter = FreqCount.read();
55    for(i = 0; i <= 278; i++)
56    {
57      raw[i] = raw[i + 1];
58    }
59    raw[279] = ((counter&(0x1<<5)) >> 5);
60
61    for(i = 0; i <= 39; i++)
62    {
63      filtered[i] = raw[7*i] + raw[7*i+1] + raw[7*i+2] + raw[7*i+3] + raw[7*i+4] + raw[7*i+5] + raw[7*i+6];
64      filtered[i] = filtered[i] >> 2;
65    }
66
67    for(i = 0; i <= 4; i++)
68    {
69      data[i] = 0;
70      for(j = 0; j <= 7; j++)
71      {
72        data[i] = data[i] | filtered[8*i + 7 - j] << j;
73      }
74    }
75
76    if(byte_data[0] == 0x5a && getCRC(data[0], data[1], data[2], data[3]) == data[4] )
77    {
78        rpm = data[1];
79        speed = data[2];
80        march = data[3];
81    }
82  }
```

(b)

Fonte: Próprio Autor

A etapa final é apresentar os dados recebidos no painel. A apresentação adota um sistema de multiplexação. Neste sistema, cada display fica aceso um instante de tempo com a informação que ele precisa apresentar, passado este período, no caso deste projeto 12 milissegundos, troca-se tanto o display acionado quanto a informação apresentada. Neste sistema as informações ficam piscando na tela de modo imperceptível ao olho humano, dando a impressão que toda informação está acesa ao mesmo tempo. A vantagem do sistema de multiplexação é a redução da necessidade de pinos do microprocessador. O painel deste projeto tem um total de 12 LEDs e 4 display 7 segmentos, e somente são usados 13 pinos do microcontrolador para acionar todos estes indicadores. Na Figura 27 apresenta-se o fluxograma deste modo de operação. O código desta operação foi omitido, pois é extenso e apenas o fluxograma já detalha bem como os displays operam.

Figura 27: Metodologia para multiplexação de displays



Fonte: Próprio Autor

Os LEDs da indicação da rotação do motor não são acionados deste modo, no caso tais LEDs são acionados pelo CI 74HC595. Este CI liga todos os LEDs necessários simultaneamente, sem a necessidade de multiplexação. Para operar este CI é necessário apenas excitá-lo com a quantidade de pulsos igual a quantidade de LEDs que se deseja acionar, por exemplo 3 pulsos ligam 3 LEDs, 7 pulsos ligam 7 LEDs etc.

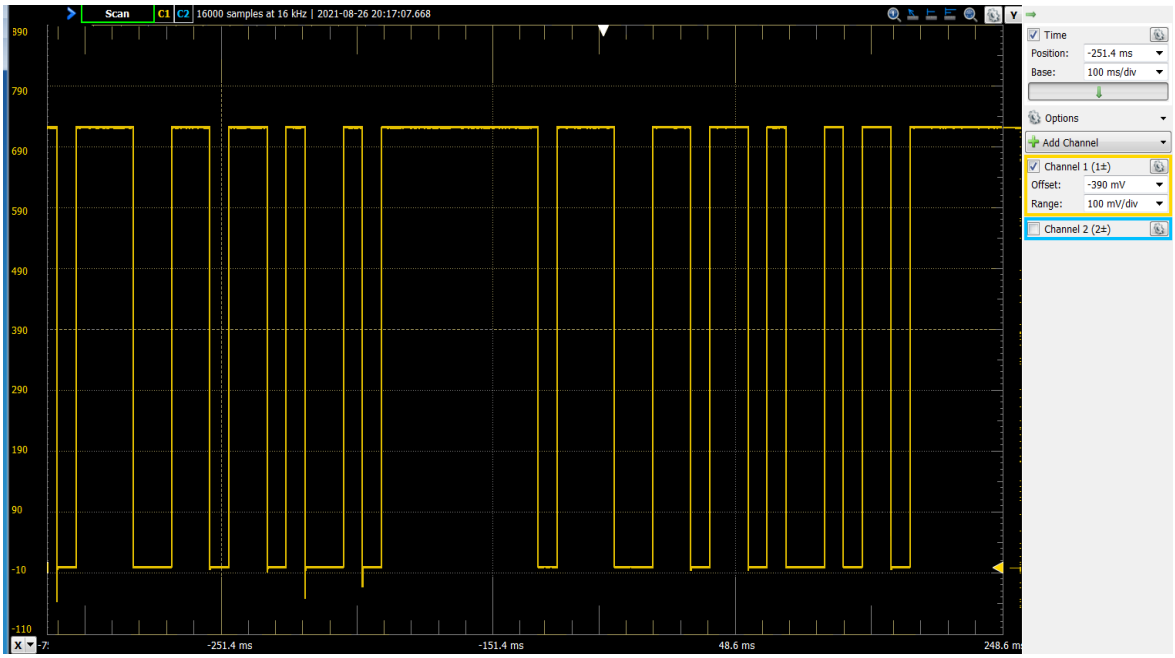
4. Resultados e Discussão

Os resultados foram colhidos utilizando uma ferramenta chamada *Analog Discovery 2*, e todo o circuito, tanto da placa transmissora quanto da placa receptora foram medidos e analisados usando esta ferramenta. Este instrumento é um analisador lógico portátil, portanto não possui uma tela, e é capaz de receber sinais analógicos ou digitais e apresentá-los na própria tela do computador. Dentre as muitas ferramentas disponíveis, este trabalho foi feito com o suporte do osciloscópio que o *Analog Discovery 2* possui.

O protótipo montado teve bons resultados, funcionando exatamente como o esperado. Os testes para esta conclusão foram realizados no protótipo confeccionado, mas o setup não pôde ser montado no carro, então no lugar de receberem informações da injeção eletrônica do carro, as informações são oriundas do terminal serial do Arduino. Um projeto auxiliar foi criado para ler as informações seriais do terminal do Arduino e transformá-las em CAN, simulando assim a função que o carro exerceria no projeto; deste modo o protótipo foi testado completamente e os resultados são apresentados nesta seção.

A informação de saída é emitida pelo microcontrolador Atmega328P, sendo que esta informação deve ter uma temporização adequada, pois a comunicação estabelecida é baseada na base de tempo de 7 ms. Na Figura 28 apresenta-se o sinal que é emitido pelo pino de saída do 328P, e vale ressaltar que a temporização é muito bem seguida, pois os pulsos de menor duração respeitam o período estipulado de 7 ms, como é necessário segundo o protocolo criado. Na Figura 28 apresenta-se o sinal modulador gerado pelo protótipo, dentro da temporização estabelecida.

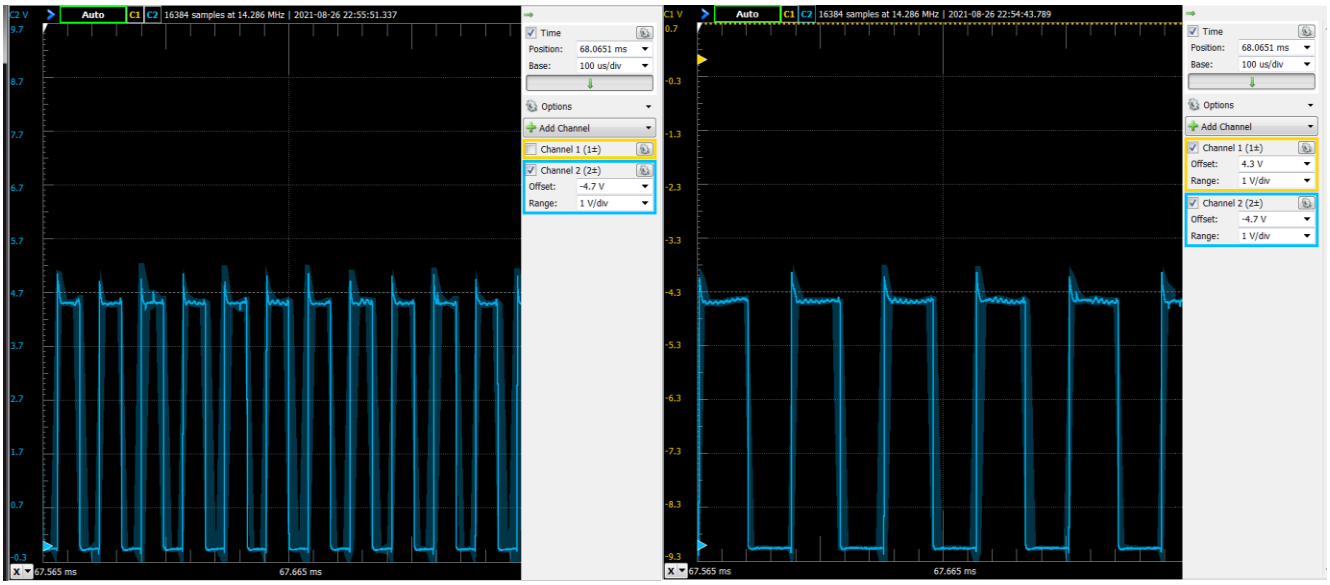
Figura 28: Observação do sinal de saída do Atmega328P



Fonte: Próprio Autor

O sinal de frequência modulada é uma onda quadrada gerada pelo CI 555. Este sinal é a portadora e é a base da comunicação. Na proposta este sinal se baseia na alteração de frequência instantânea, conforme o sinal modulador. Sendo assim, o circuito deve ser capaz de gerar duas frequências distintas: uma frequência considerada alta, maior que 32 kHz e uma frequência considerada baixa, menor que 32 kHz. Na Figura 29 apresenta-se estes dois estados de excitação do circuito gerador da onda portadora, sendo que na Figura 29a apresenta-se o estado de alta frequência e na Figura 29b, o estado de baixa frequência.

Figura 29: Comparação entre alta(a) e baixa(b) frequência da portadora

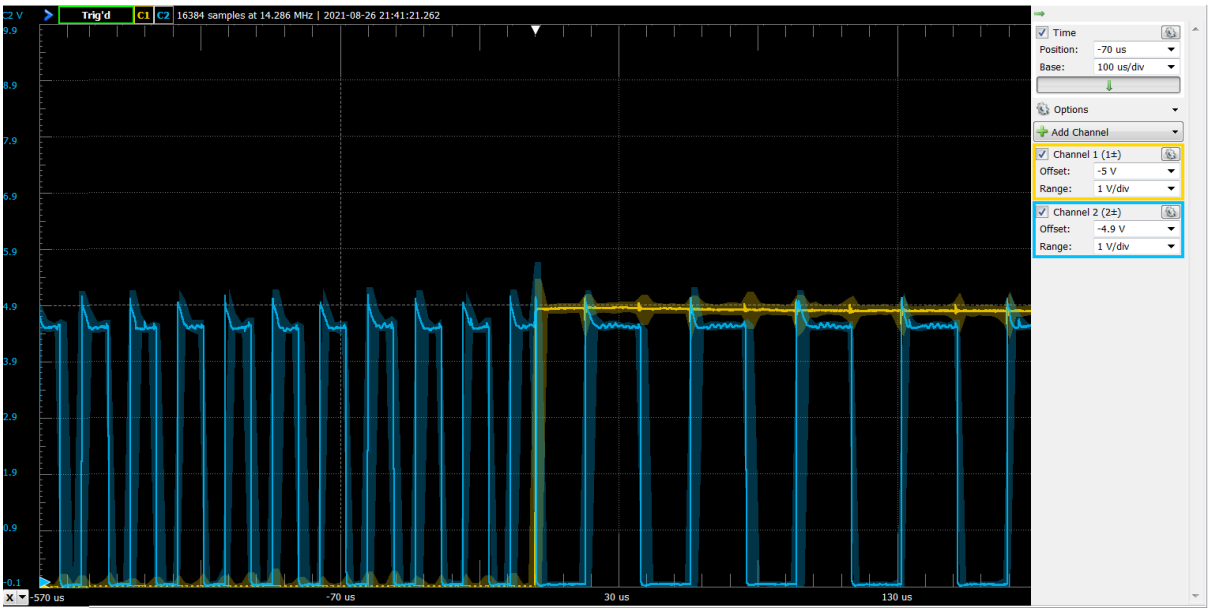


Fonte: Próprio Autor

Observando-se o sinal apresentado na Figura é possível calcular que a alta frequência está muito próxima a 60 kHz e a baixa frequência está em torno de 25 kHz. Deste resultado vê-se que o erro em relação ao valor teórico é de 33% para a alta frequência e de 25% para a baixa frequência. Estes erros são facilmente explicáveis pela tolerância dos componentes envolvidos, o capacitor tem um erro de até 20% do especificado e o resistor pode chegar a ter até 5% do especificado. Tais diferenças dos valores teóricos podem ser ignoradas, já que a premissa é que a alta frequência seja superior a 32 kHz e a baixa frequência seja inferior a este mesmo limiar. Como é possível perceber, esta condição é perfeitamente atendida com o resultado obtido por meio do circuito montado na prática.

O sinal de frequência modulada se altera de acordo com o sinal modulador emitido pelo pino do microcontrolador Atmega328P. O sinal modulador excita o circuito que gera o sinal da portadora, assim alterando sua frequência. Na Figura 30 apresenta-se o sinal da portadora de frequência modulada em relação ao sinal modulador, no qual pode-se verificar como a frequência se altera no momento em que a moduladora muda do nível baixo para o nível alto.

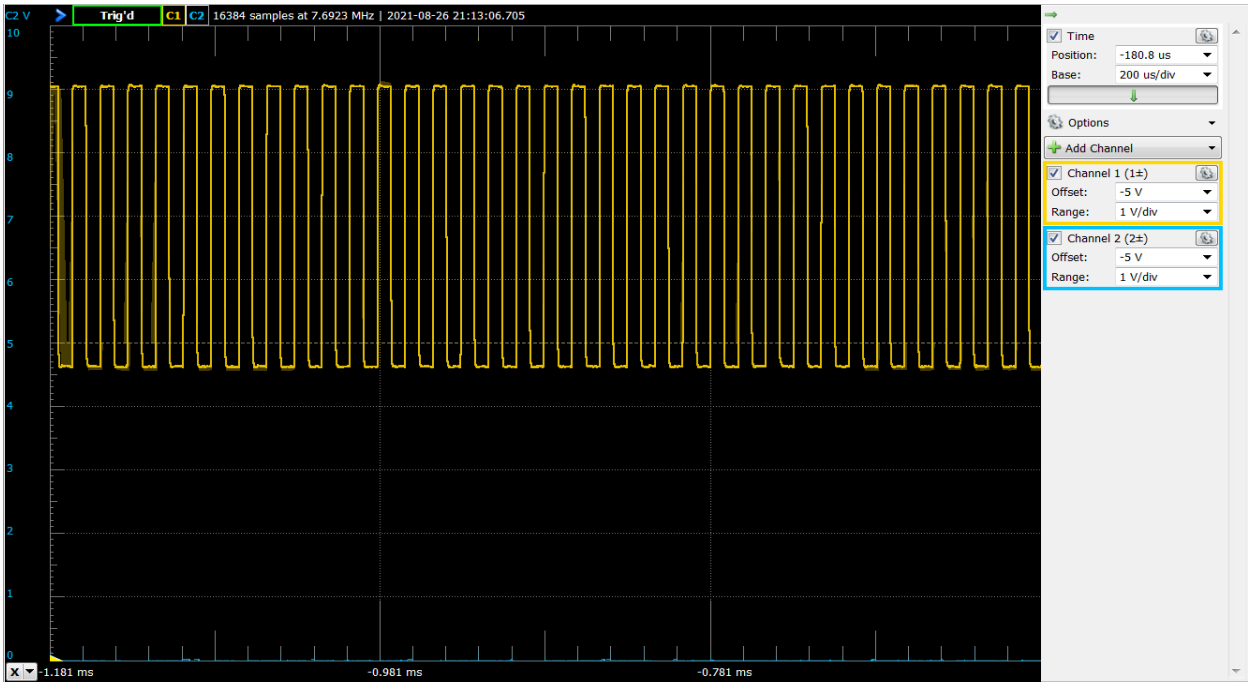
Figura 30: Sinal Portador(azul) vs Sinal Modulador(amarelo)



Fonte: Próprio Autor

O sinal de portadora modulado em frequência varia de 0 volt à 5 volts, este deve ser somado ao sinal de alimentação, e juntos formam o sinal composto, capaz de transmitir alimentação e FM. O que se espera ao observar a saída transmissora é um sinal de portadora deslocado em relação ao 0 volt. Na Figura 31 apresenta-se este resultado e evidencia o comportamento esperado, note que a referência do osciloscópio está no extremo inferior e que o sinal FM varia de 4,6 volts até 9 volts, portanto é deslocado em relação ao 0 volt.

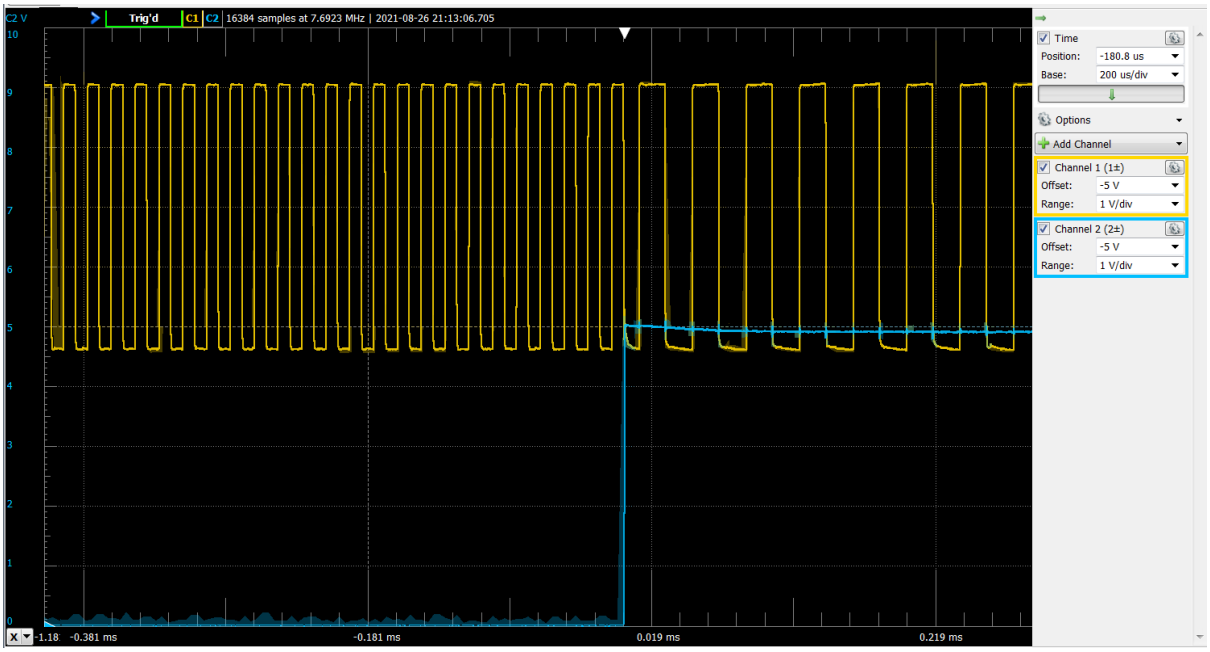
Figura 31: Sinal composto de alimentação mais FM



Fonte: Próprio Autor

Por fim, o que se deseja é que o sinal composto também varie de frequência de acordo com o sinal modulador, do mesmo modo que o sinal portador varia. Analisando a saída do sinal composto se espera ver uma variação na frequência de um sinal deslocado em relação ao 0 volt. Na Figura 32 evidencia-se o comportamento esperado, note que assim que ocorre uma mudança de nível do sinal modulador, o portador deslocado varia sua frequência, esta Figura é extremamente representativa, pois nela todos os sinais gerados se relacionam e se tornam o sinal composto.

Figura 32: Sinal composto variando de acordo com o modulador

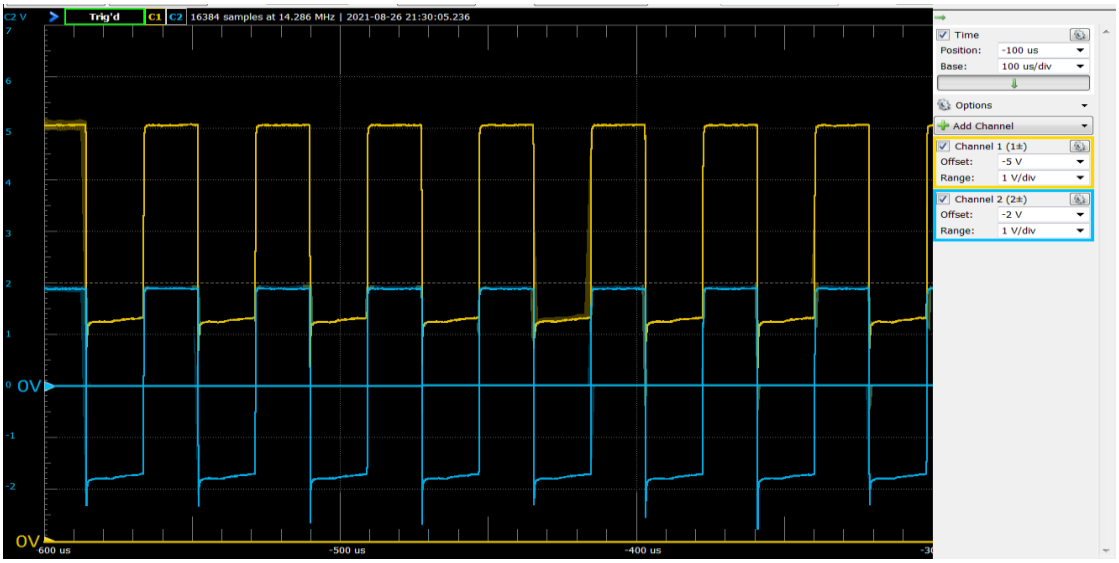


Fonte: Próprio Autor

O sinal composto apresentado na Figura 32 é o sinal que chega até a placa receptora. Esta separa a alimentação do sinal FM, que realiza como primeiro processo a separação da alimentação e dos dados.

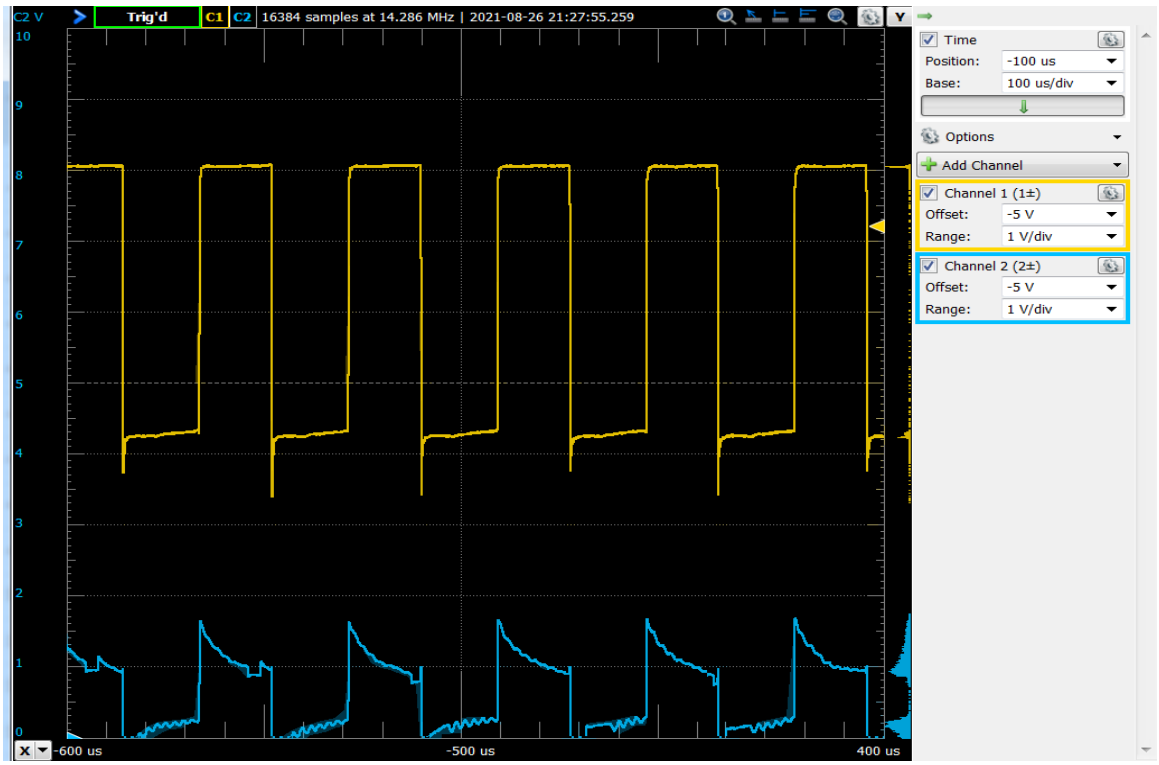
O sinal composto passa por um filtro RC passa alta, onde a capacitância é de 470 uF e a resistência de 47 kΩ, resultando em uma frequência de corte de 0,0072 Hz. Esta frequência de corte extremamente baixa garante que toda parte DC ficará sobre o capacitor e qualquer variação que houver ficará sobre o resistor. Como apresentado na Figura 19, o sinal de saída será coletado a partir do resistor, caracterizando este filtro como passa alta. Em um filtro com frequência de corte tão baixa, até a menor frequência que compõe a onda quadrada ficará aplicada sobre o resistor e será coletada para a fase de análise. Na Figura 33 apresenta-se o sinal filtrado em relação ao sinal composto recebido, na qual é possível notar que toda parte DC fica no capacitor, isto inclui a tensão média que faz parte de uma onda quadrada. Deste modo o sinal filtrado aparece com valores na parte negativa do gráfico, apesar de nenhuma tensão negativa ter sido gerada anteriormente, este sinal passa por um capacitor de desacoplamento, de 15 pF, que é capaz de remover a porção negativa do sinal. Na Figura 34 apresenta-se o sinal após a remoção da parte negativa. As referências dos sinais na Figura 33 foram destacadas para uma melhor compreensão da filtragem e melhor percepção da porção negativa no sinal filtrado, representado em azul.

Figura 33: Sinal composto(Amarelo) sinal após filtro RC(Azul)



Fonte: Próprio Autor

Figura 34: Sinal composto(Amarelo) e sinal desacoplado(Azul)

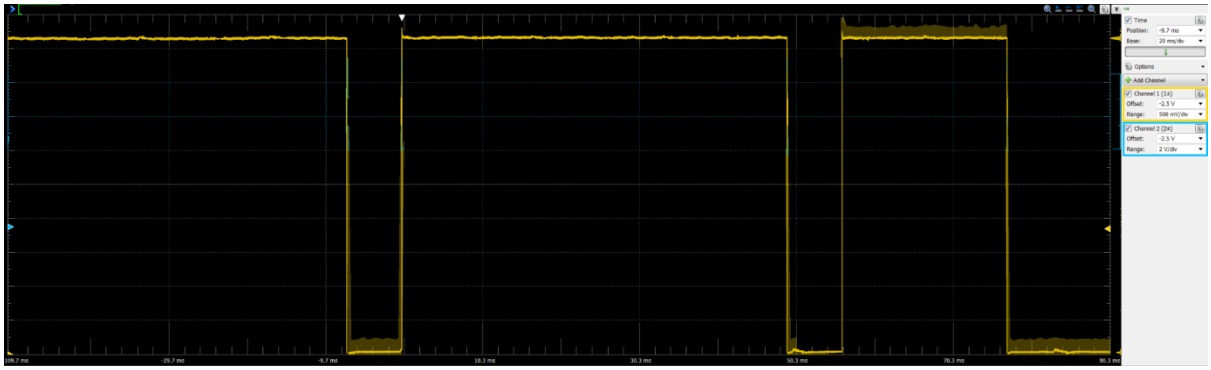


Fonte: Próprio Autor

A etapa final do tratamento que prepara o sinal para ser aplicado no Atmega328P é feita por um CI 555, que recebe o sinal irregular azul da Figura 34 e o coloca nos níveis aceitos pelo microcontrolador Atmega328p. Este sinal já é a informação final que será recebida e interpretada pelo microcontrolador receptor. Na Figura 35 apresenta-se este sinal

já completamente filtrado e dentro dos limites necessários. Vale ressaltar que o sinal está variando entre 0 volt e 4,5 volts.

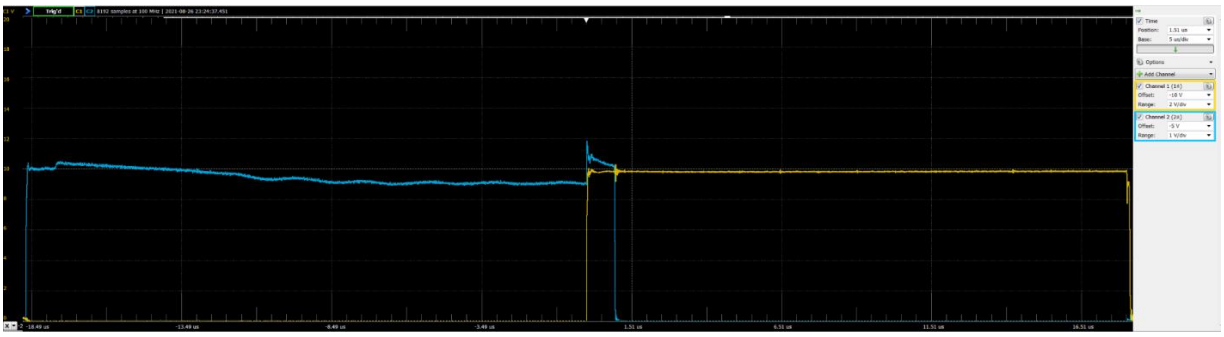
Figura 35: Sinal FM completamente filtrado



Fonte: Próprio Autor

Na Figura 35 observa-se o momento de transição entre baixa frequência, com períodos maiores, e a alta frequência, períodos mais curtos, e nota-se um sinal estável em todas as condições. Uma comparação muito interessante é imaginar quanto tempo demora para um sinal se propagar da placa transmissora para a placa receptora, e a Figura 36 apresenta o experimento que calcula este tempo. O canal 2 do osciloscópio (azul) é colocado no gerador de circuito composto, o canal 1 (amarelo) observa a saída do último estágio do filtro, pôde-se observar pela escala de tempo que a propagação leva em torno de 18,5 microssegundos. O tempo é calculado pela diferença entre o tempo de subida do sinal composto, sinal azul, e o tempo de subida do sinal filtrado, sinal amarelo.

Figura 36: Estimativa do tempo de propagação

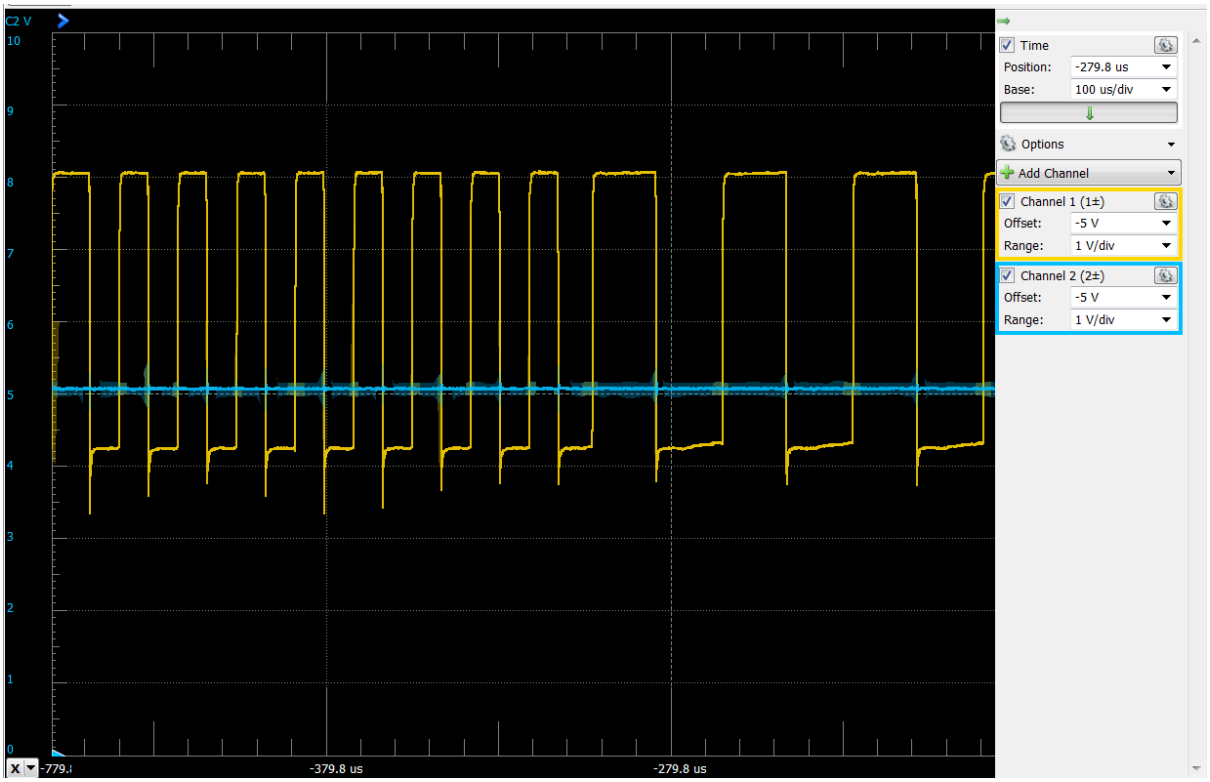


Fonte: Próprio Autor

Por fim é apresentada a filtragem da alimentação. Como a alimentação é filtrada com diodos, capacitores e o CI LM7805, é simples apresentar e constatar a filtragem. Na Figura

37 apresenta-se o sinal composto de entrada em amarelo e o sinal de alimentação completamente filtrado em azul. Repare que a referência do osciloscópio está no extremo inferior da tela, portanto, a alimentação é filtrada perfeitamente nos 5 volts que o circuito receptor demanda para funcionar.

Figura 37: Sinal composto em amarelo e sinal de alimentação filtrado em azul



Fonte: Próprio Autor

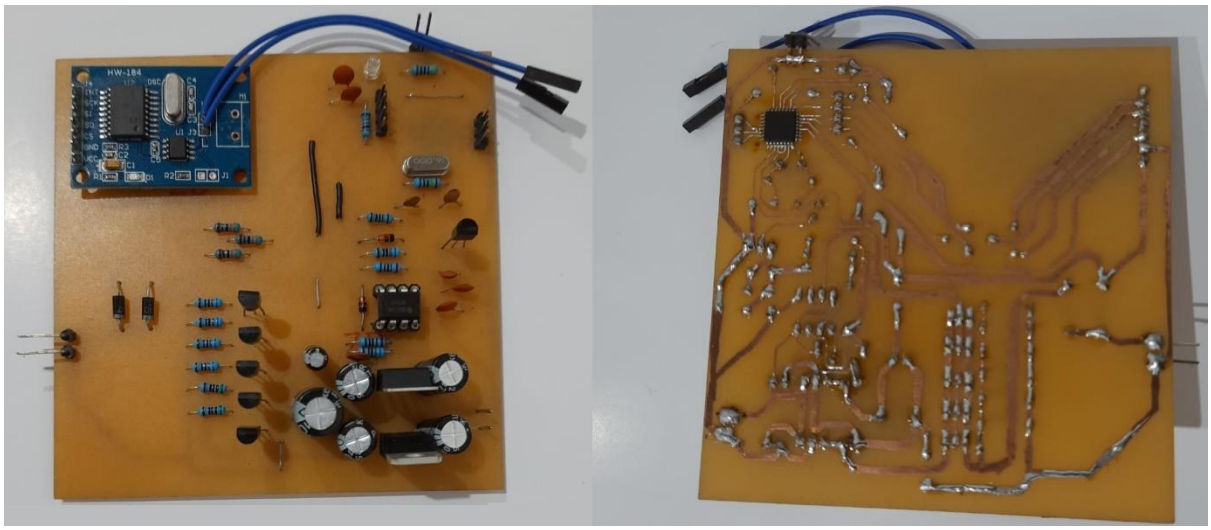
Como não foi possível o teste no ambiente final, o carro da equipe de Fórmula SAE Fênix Racing, um novo circuito de suporte foi desenvolvido para simular o comportamento do carro, e neste projeto as informações são enviadas pelo terminal serial do Arduino, como é mostrado na Figura 38. O circuito foi montado na prática, e apresentou bons resultados, sendo observado funcionamento idêntico ao modo que ocorreria caso o projeto fosse montado no carro.

Figura 38: Terminal serial recebendo informações que são enviadas pela CAN

Fonte: Próprio Autor

Na Figura 38 o que se vê enviado é um vetor separado por ponto e vírgula, a primeira posição representa 3 mil RPM, a segunda posição 25 km/h e a terceira posição é a 5ª marcha. Na Figura 39 apresenta-se o circuito transmissor, a frente e o verso da placa. É possível notar uma placa azul, esta é o módulo CAN.

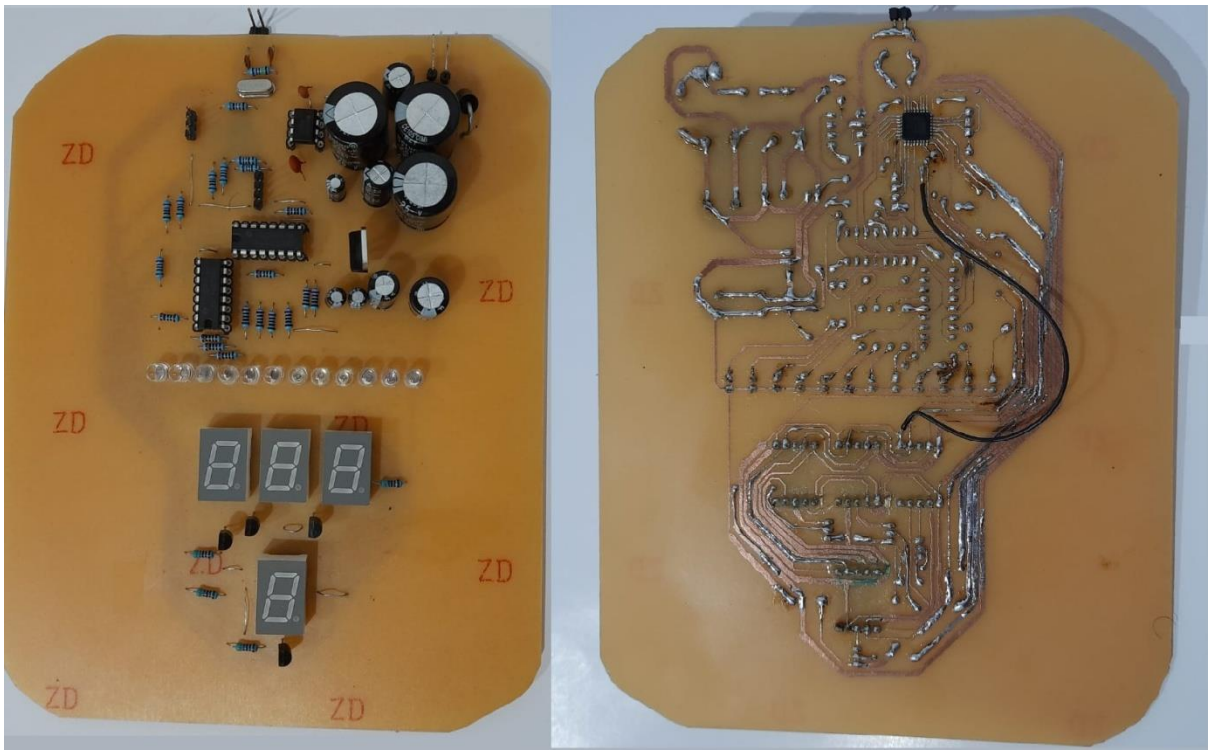
Figura 39: Frente e verso da placa transmissora



Fonte: Próprio Autor

Na Figura 40 apresenta-se a placa receptora frente e verso também, note que nela estão os LEDs e os displays que serão o painel do carro.

Figura 40: Frente e verso da placa receptora

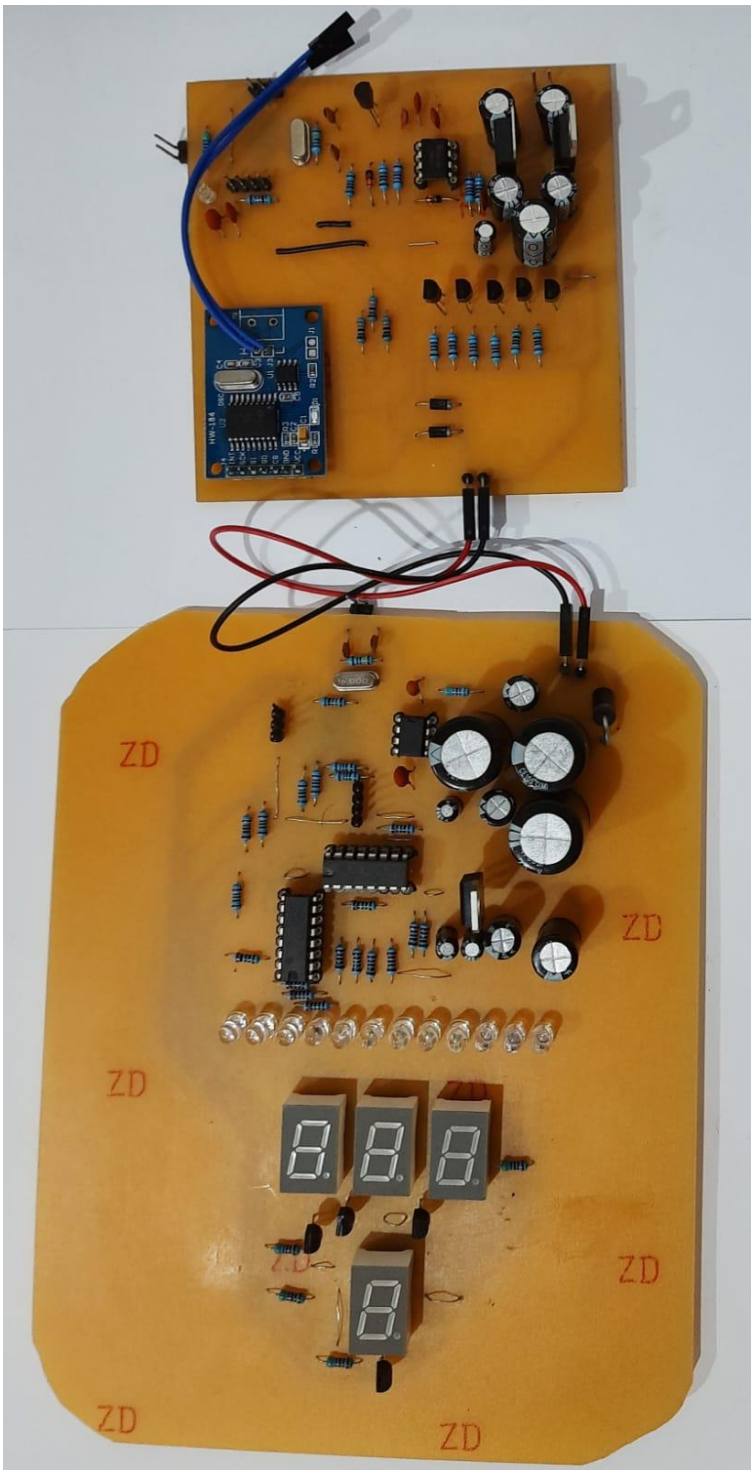


Fonte: Próprio Autor

Pequenas adaptações foram necessárias, como é possível ver pelo fio preto corrigindo falhas nas trilhas, porém, estes detalhes não comprometeram em nada o funcionamento do projeto.

Na Figura 41 apresenta-se a ligação entre a placa transmissora e a placa receptora, sendo bem ilustrativa, pois apresenta o fato de só haver uma ligação de dois fios entre ambas as placas, por onde transitam as informações e a alimentação.

Figura 41: Ligação entre placa transmissora e receptora

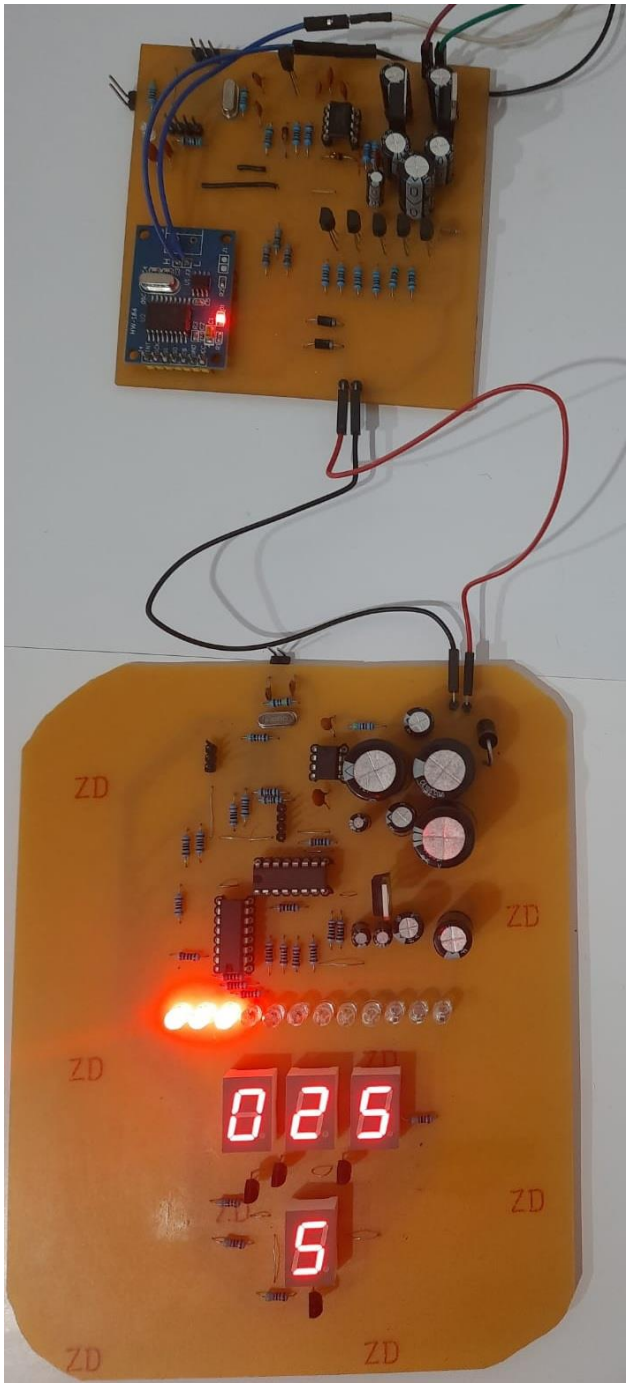


Fonte: Próprio Autor

Na Figura 41 há dois fios azuis na placa transmissora, estes fios são os responsáveis pela comunicação CAN, é através deles que o carro deve enviar a transmissão com seus dados. O fio preto e vermelho são os responsáveis pela comunicação desenvolvida neste trabalho.

Na Figura 42 apresenta-se o circuito ligado, e nesta imagem vê-se mais nitidamente os fios que ligam as placas entre si, também é possível notar que agora há na placa transmissora 4 fios ligados. Destes, 2 são a alimentação da própria placa transmissora, e os outros 2 os fios da comunicação CAN. Esta imagem representa bem o projeto, note que a placa receptora é alimentada e recebe as informações e nela só há 2 fios ligados, os fios do sinal composto.

Figura 42: Projeto em funcionamento

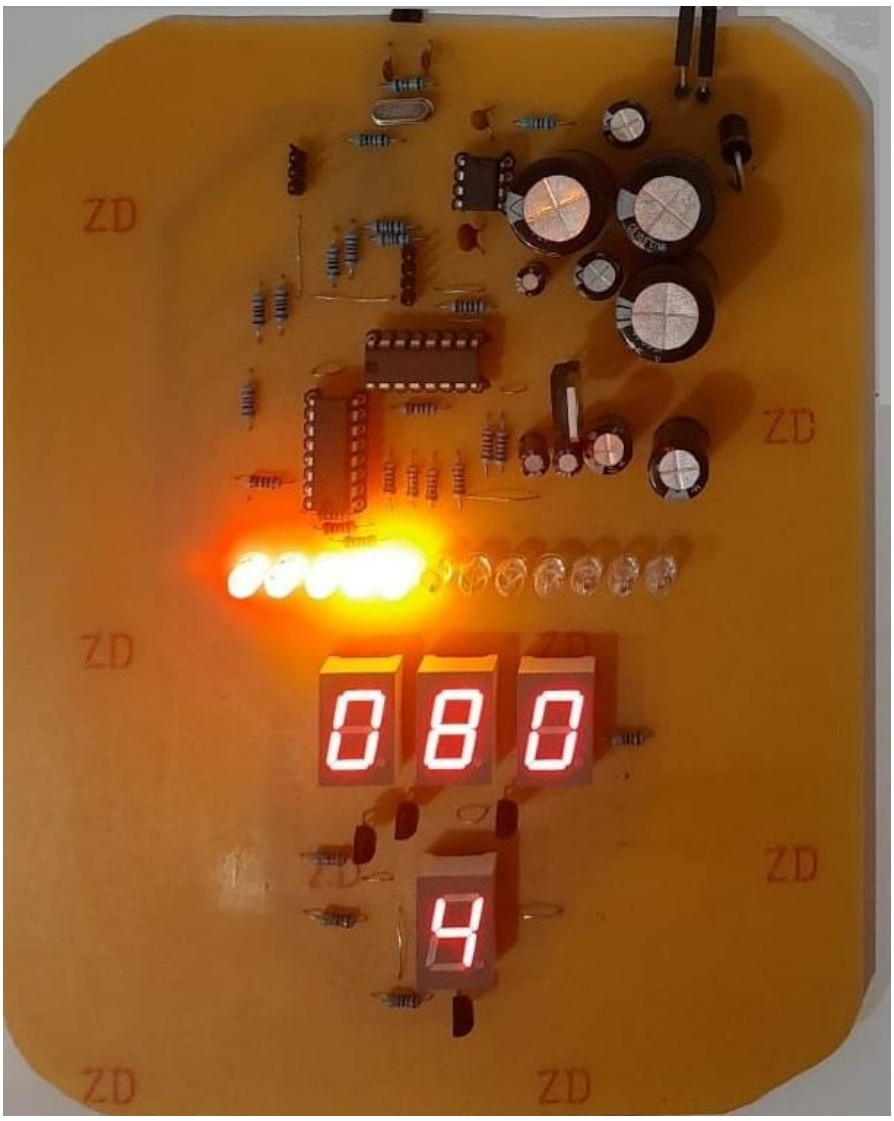


Fonte: Próprio Autor

Para evidenciar o funcionamento total do setup de teste, note que as informações que são apresentadas no painel na Figura 42 são as mesmas informações enviadas pelo terminal serial do Arduino na Figura 38. Vale mais uma vez reforçar todo o fluxo da informação no setup de teste. O dado é criado no terminal serial do Arduino, estes dados são transmitidos por UART para o Arduino de suporte, este Arduino de suporte transfere via CAN para a placa transmissora do projeto os dados digitados no terminal, estes dados então são transferidos pela comunicação desenvolvida neste trabalho para a placa receptora.

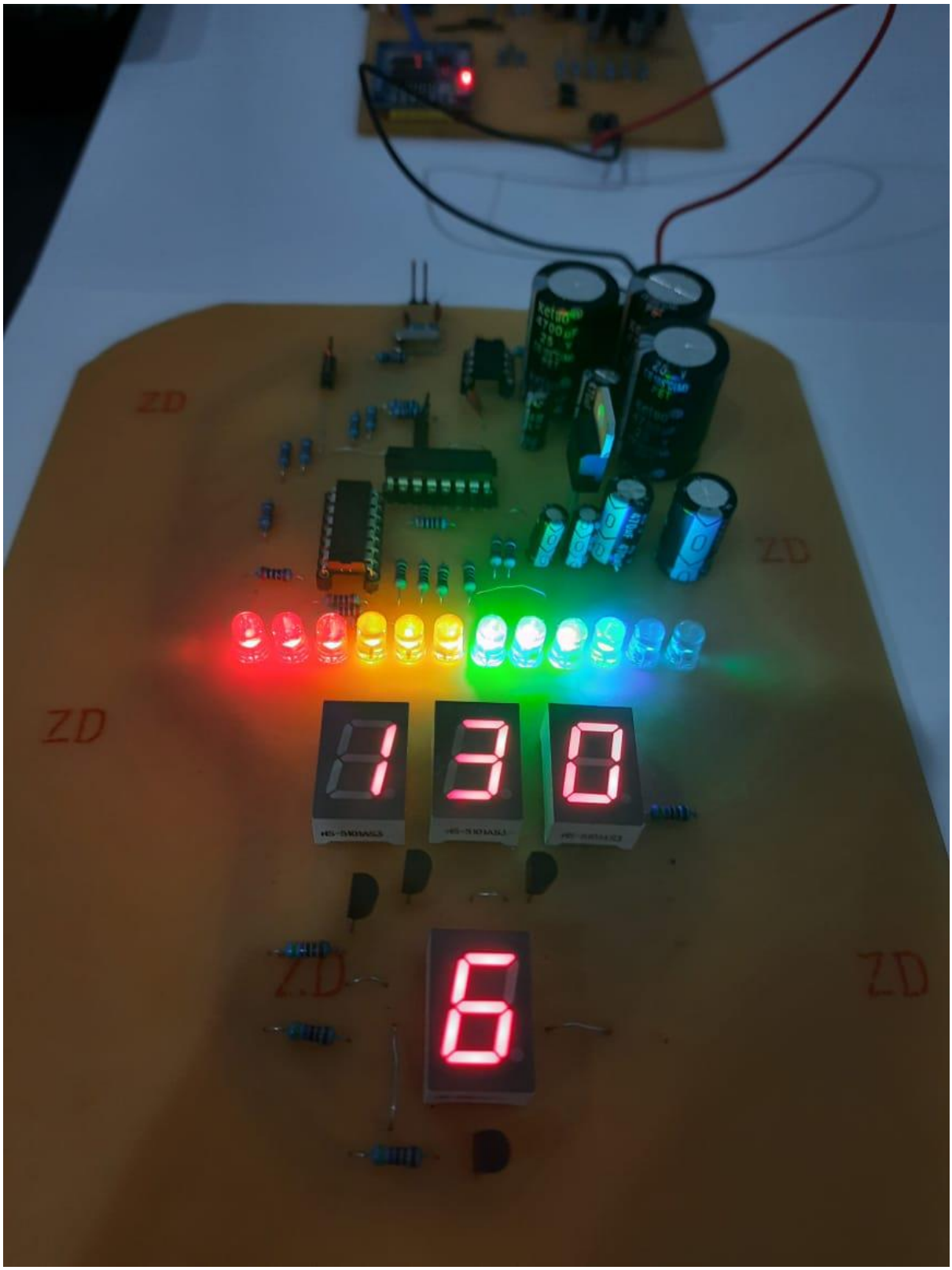
Para maiores ilustrações, da Figura 43 até a Figura 45 são apresentados o painel sendo acionado com informações diferentes, apenas para mostrar o correto funcionamento do projeto.

Figura 43: Painel indicando 5 mil RPM, 80 Km/h e 4ª marcha



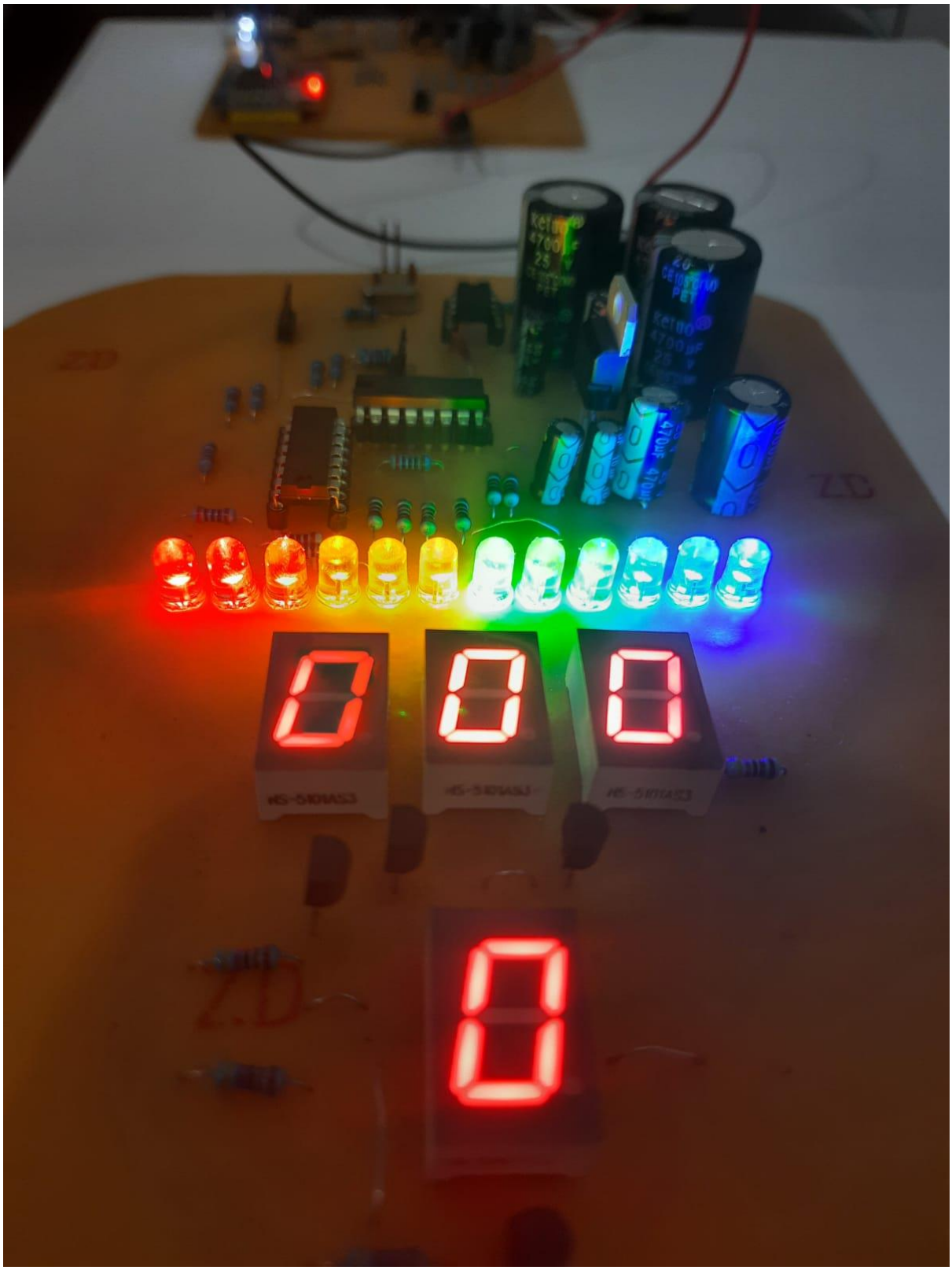
Fonte: Próprio Autor

Figura 44: Painel indicando 10 mil RPM, 130 Km/h e 6ª marcha



Fonte: Próprio Autor

Figura 45: Rotação completamente acionada



Fonte: Próprio Autor

Após testado em algumas circunstâncias, alguns comentários podem ser feitos sobre o projeto. O primeiro é a velocidade de transmissão: em teoria, o projeto suporta transferências de até 142 bits por segundo, porém, na prática, a taxa de transferência que se mostrou viável foi de 24 bits por segundo. Isto pois ocorre de alguns pacotes de dados serem corrompidos, e assim serem descartados no momento do cálculo de CRC. Esta taxa de transmissão é satisfatória para uso neste projeto, porém pode se tornar uma barreira em outras aplicações.

Nos testes realizados notou-se que há perda de pacotes, mas estas perdas esporádicas não comprometem o funcionamento. Num levantamento na etapa de testes, notou-se algo em torno de 1% de pacotes perdidos. Esta perda é percebida, porém não compromete o funcionamento, pois a informação é repetidamente transmitida, então mesmo que um pacote seja perdido, ele logo é retransmitido e pode ser coletado novamente.

Os reguladores de tensão não tiveram uma elevação grande em sua temperatura, isso indica que eles são capazes de alimentar todo o circuito em sua região de operação segura sem a necessidade de dissipadores de calor.

A apresentação dos dados do painel é satisfatória. No uso em campo no carro, há momentos onde ocorre a pilotagem do carro no mesmo sentido do sol, nestes momentos a visualização do painel pelo piloto pode ser prejudicada, em painéis com pouca luminosidade. O protótipo desenvolvido foi testado nesta condição, onde a visualização é comprometida, e mesmo assim foi possível enxergá-lo de forma satisfatória.

5. Conclusões

O projeto do sistema foi concluído e executado com êxito, cada detalhe projetado funcionou como esperado no protótipo, demonstrando assim a viabilidade de utilizar esta ideia como forma de comunicação. Observou-se desvantagens no uso desta tecnologia, ela saiu relativamente cara comparado com as atuais redes wireless. Atualmente o uso de redes bluetooth e wi-fi estão muito simplificados e baratos, tornando então possível usar redes wireless como substituto deste projeto. Porém, a tecnologia PLC proposta aqui tem muito a evoluir, e com mais estudos sobre ela é possível torná-la mais competitiva em alguns cenários, como no caso onde se deseja passar sinais em locais com muitas barreiras físicas ou tornar comunicações inacessíveis a interceptações, coisa que é bem possível em redes wireless.

Algumas melhorias podem ser propostas sobre pontos já discutidos. Sobre a taxa de transmissão duas propostas para a elevar seriam: aumentar a frequência da portadora e diminuir o tempo de amostragem do sinal. Atualmente a frequência da portadora gira em torno do limiar de 32 kHz e o período de amostragem é de 7 ms. Aumentando a frequência limiar para 512 kHz, a janela de aquisição precisaria ser de 400 us, isto aumentaria para até 2,2 kbits/s de taxa de transferência.

Outro possível ponto de melhoria seria o consumo de energia, foi realizado um teste de consumo de corrente em dois casos, o menor consumo e o maior consumo. O menor consumo medido foi de 190 mA, e o maior consumo medido foi de 340 mA. Em um carro este nível de consumo é irrisório, pois a bateria do carro possui capacidade de 14 Ampere * hora, e para consumi-la completamente o sistema implementado deveria ficar ligado 41 horas. Apesar disto, a redução de consumo é algo sempre desejável. Algumas ideias para economia são possíveis para aprimorar o projeto.

A primeira ideia é trocar os reguladores lineares por reguladores chaveados, pois isso eliminaria as perdas por aquecimento que ocorrem nos três componentes reguladores do projeto. Uma segunda ideia de economia seria trocar radicalmente a onda portadora. Atualmente a portadora é uma onda quadrada de 5 Vpp, esta onda poderia ser trocada para uma onda puramente senoidal, com alguns milivolts de amplitude, esta mudança acarretaria em maior eficácia energética na comunicação. Em uma onda quadrada a largura de banda é relativamente grande, desperdiçando assim energia em frequências que não são de interesse na comunicação. Outro aspecto desvantajoso na onda quadrada atual é sua amplitude, pois

muito desta tensão é desperdiçada no filtro RC, sendo então desnecessária a criação desta porção. Além da perda no filtro RC, uma portadora de 5 Vpp aumenta a tensão de alimentação da placa receptora para 9 volts de pico, e com isso aumenta o desperdício que ocorre no momento em que a alimentação sofre a redução para os 5 V de alimentação do circuito.

Mais uma ideia de redução de consumo é alterar os resistores dos LEDs. No projeto atual todos os LEDs tem seu consumo limitado por resistores de 200 Ohms, porém, notou-se que alguns brilham demasiadamente. Caso houvesse algum estudo neste sentido, seria possível reduzir o consumo dos LEDs, e permitir um brilho satisfatório para a visualização do piloto sem desconforto visual e com menos gasto de energia. Uma proposta que também economizaria energia na apresentação dos dados, seria a utilização de um display de cristal líquido. O consumo de um display deste pode chegar a ordem de dezenas de microamperes, um consumo muito baixo comparado às centenas de miliamperes consumidas atualmente.

Uma última idéia de redução de consumo seria a redução da frequência de operação do microcontrolador. O projeto não exige cálculos intensos e nem monitoramento de eventos muito rápidos, neste caso a frequência de operação poderia ser reduzida para até 1 MHz, sendo que o valor atual é de 16 MHz. Isto ocasionaria uma redução muito drástica no consumo do microcontrolador, já que a frequência de clock ocasiona consumo de energia elétrica nas capacitâncias internas do microcontrolador.

A melhoria sobre a onda portadora seria uma das mais importantes de ser executada no projeto. Isto ocorre pois traz mais benefícios que apenas a economia de energia. Uma onda gerada que transita por longos condutores pode acarretar em emissões de ondas de rádio, criando interferências e impedindo o uso legal e regulamentado. Reduzir a amplitude desta onda seria uma solução para este problema. A ideia inicial executada foi uma onda quadrada com alguns milivolts de amplitude, porém, o amplificador operacional utilizado não tinha condições de amplificar satisfatoriamente a onda quadrada. Alterações no circuito amplificador podem resultar em uma amplificação mais efetiva, e assim permitir que o sinal portador seja reduzido em amplitude.

Outra proposta de melhoria pode ser a redução do circuito como um todo, tendo em vista que o espaço é limitante no projeto do Fórmula. O tamanho da placa receptora é de 15 cm x 20 cm, e o da placa transmissora é de 10 cm x 10 cm. Elas poderiam ser diminuídas até a metade disso com algumas alterações bem simples. A troca dos componentes atuais por componentes SMD, e a redução dos capacitores utilizados para filtragem da alimentação trariam uma diminuição significativa. A troca do shield CAN do Arduino pelos mesmos

componentes discretos do shield CAN também economizaria espaço na placa. Para criar o sinal composto são utilizados 5 transistores BC338, e tais transistores poderiam ser substituídos por apenas um TIP122 de potência, ocasionando em outra redução de espaço.

Por fim o projeto, como visto, foi montado na prática, para este protótipo todos os componentes foram comprados individualmente, o que eleva o custo. O custo de material do projeto pode ser melhorado com economia em escala. A lista de materiais junto com os custos é discriminada na tabela 1, no apêndice A.

Referências Bibliográficas

COMMONS, Wikimedia. **CAN-Frame mit Pegeln mit Stuffbits.** 2014. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:CAN-Frame_mit_Pegeln_mit_Stuffbits.svg>. Acesso em: 28 ago. 2021.

CUETO, Bruno. **PROTOCOLO DE COMUNICAÇÃO CAN APLICADO A VEÍCULOS**: estudo, projeto e implementação de um equipamento com finalidade didática. 2018. 55 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2018. Disponível em: http://www.eletrica.ufpr.br/tcc/2018/1s/BRUNO%20CUETO/RELATORIO%20TCC%20BRUNO%20CUETO%202018-1.pdf. Acesso em: 29 out. 2021.

DANTAS, A. A "MATEMÁGICA" DA RODA FÔNICA. In: STUDIO A. **Blog AUTOentusiastas Classic**. 20 out. 2011. Disponível em: http://www.autoentusiastasclassic.com.br/2011/10/matemagica-da-roda-fonica.html. Acesso em: 10 jul. 2021.

FERREIRA, Eduardo Henrique Corrêa. **AUTOMAÇÃO RESIDENCIAL UTILIZANDO PROTOCOLO CAN**. 2009. 54 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009. Disponível em: http://www.eletrica.ufpr.br/p/arquivostccs/28.pdf. Acesso em: 14 ago. 2021

FRÖHLICH, A. A.; SOUZA, D. T.; BRATTI, D. **Sistemas Automotivos Embarcados**. Santa Catarina, 2008. Disponível em: https://lisha.ufsc.br/teaching/os/ine5412-2008-2/work/auto.pdf. Acesso em: 20 ago. 2021

FSAE (Warrendale) (org.). **Competition History**. Warrendale: Sae International, 2005. Disponível em: https://web.archive.org/web/20050513220537/http://www.sae.org/students/fsaehistory.pdf. Acesso em: 3 ago. 2021. p. 39-52

HONÓRIO, Igor Silva. **Desenvolvimento de uma panela para a produção de cerveja**. 2018. 59 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Controle e Automação, Universidade

Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018. Disponível em: http://monografias.ufop.br/handle/35400000/1410. Acesso em: 29 out. 2021.

MALATHI, P.; VANATHI, P. T. **Power Line Communication using OFDM and OGA**, AIML Journal, Volume 7, 2007.

MATHEW, Sabin. **Clutch, How does it work ?** 2017. <https://youtu.be/devo3kdSPQY?t=101> Acesso em: 29 out. 2021.

MILLIKEN, W. F.; MILLIKEN, D. L. **Race Car Vehicle Dynamics**. Warrendale: Sae International, 1995.

MOTORSHOW. **Desafio Motor Show: adivinhe cinco carros nacionais pelo painel**. 2015. <motorshow.com.br/desafio-motor-show-advinhe-cinco-carros-nacionais-pelo-painel/>. Acesso em: 28 ago. 2021.

NUÑEZ, A. **An Introduction to the CAN Bus: how to programmatically control a car**. In: STUDIO A. **Blog VOYAGE**. 4 jun. 2017. Disponível em: https://news.voyage.auto/an-introduction-to-the-can-bus-how-to-programmatically-control-a-car-f1b18be4f377. Acesso em: 10 jul. 2021.

RAMIREZ BOHORQUEZ, Jose Luis. **Sensor Hall com geometria octogonal e com cancelamento de offset, preparado para o estudo do efeito Piezo-Hall**. 2015. 1 recurso online (114 p.). Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Campinas, SP. Disponível em: <http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/259027>. Acesso em: 28 ago. 2021.

ROBERT B. G. (Alemanha). **Manual de Tecnologia Automotiva**. 25. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2004.

ROYCE, S.; ROYCE, M.. **Learn & Compete: A Primer for Formula SAE, Formula Student and Formula Hybrid Teams**. Londres: Kimberley Media Group, 2012.

SAE. **SAE International's Collegiate Design Series (CDS) competitions.** 2021**.** <https://www.sae.org/attend/student-events>. Acesso em: 28 ago. 2021.

SCHUMANN, T.; MENON, C. J. **Fieldbus Systems and Their Applications 2005**: a proceedings volume from the 6th ifac international conference. Puebla: Elsevier Ifac, 2005.

SEGERS, J. **Analysis Techniques for Racecar Data Acquisition**. 2. ed. Warrendale: Sae International, 2014.

SILVA, Bruno Gomes da et al. ARR – **Auto regulador de rotação**. 2014. 74 f. TCC - Curso de Técnico em Mecatrônica, Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, São Caetano do Sul.

SILVA, Vagner. **Diagrama sensor de fase**. 2013. <https://www.flickr.com/photos/vagnerarte/8628255038>. Acesso em: 28 ago. 2021.

TANENBAUM, Andrew Stuart. **Redes de computadores**. 4. ed. Amsterdam: Campus, 2003.

Apêndices

APÊNDICE A - Discriminação de Preços

Tabela 1: Preço do Projeto

Componente	Quantidade	Preço/Unidade		Preço Total	
LM555	2	R$	1,04	R$	2,08
MCP2515	1	R$	30,00	R$	30,00
Cristal 16MHz	2	R$	1,50	R$	3,00
LM7805	2	R$	1,60	R$	3,20
LM7809	1	R$	1,70	R$	1,70
BC338	9	R$	0,50	R$	4,50
Resistores	43	R$	0,10	R$	4,30
Cap 15 pF	1	R$	0,05	R$	0,05
Cap 10 nF	1	R$	0,30	R$	0,30
Cap 100 nF	6	R$	0,30	R$	1,80
Cap 22 pF	4	R$	0,37	R$	1,48
Cap 470 uF	7	R$	0,40	R$	2,80
Cap 10 uF	4	R$	0,10	R$	0,40
Cap 1000 uF	2	R$	0,30	R$	0,60
Cap 4700 uF	3	R$	2,50	R$	7,50
ATMEGA328P	2	R$	25,30	R$	50,60
74HC595	2	R$	2,20	R$	4,40
Led Verm.	4	R$	0,40	R$	1,60
Led Verde	4	R$	0,90	R$	3,60
Led Amarelo	4	R$	0,50	R$	2,00
Led Azul	4	R$	0,52	R$	2,08
Display 7 seg	4	R$	2,50	R$	10,00
Diodo 1N4148	2	R$	0,10	R$	0,20
Diodo 1N4007	2	R$	0,20	R$	0,40
Diodo 1N5822	1	R$	0,75	R$	0,75
		Total		R$	139,34

APÊNDICE B - Circuitos Elétricos

Figura 46: Circuito transmissor completo

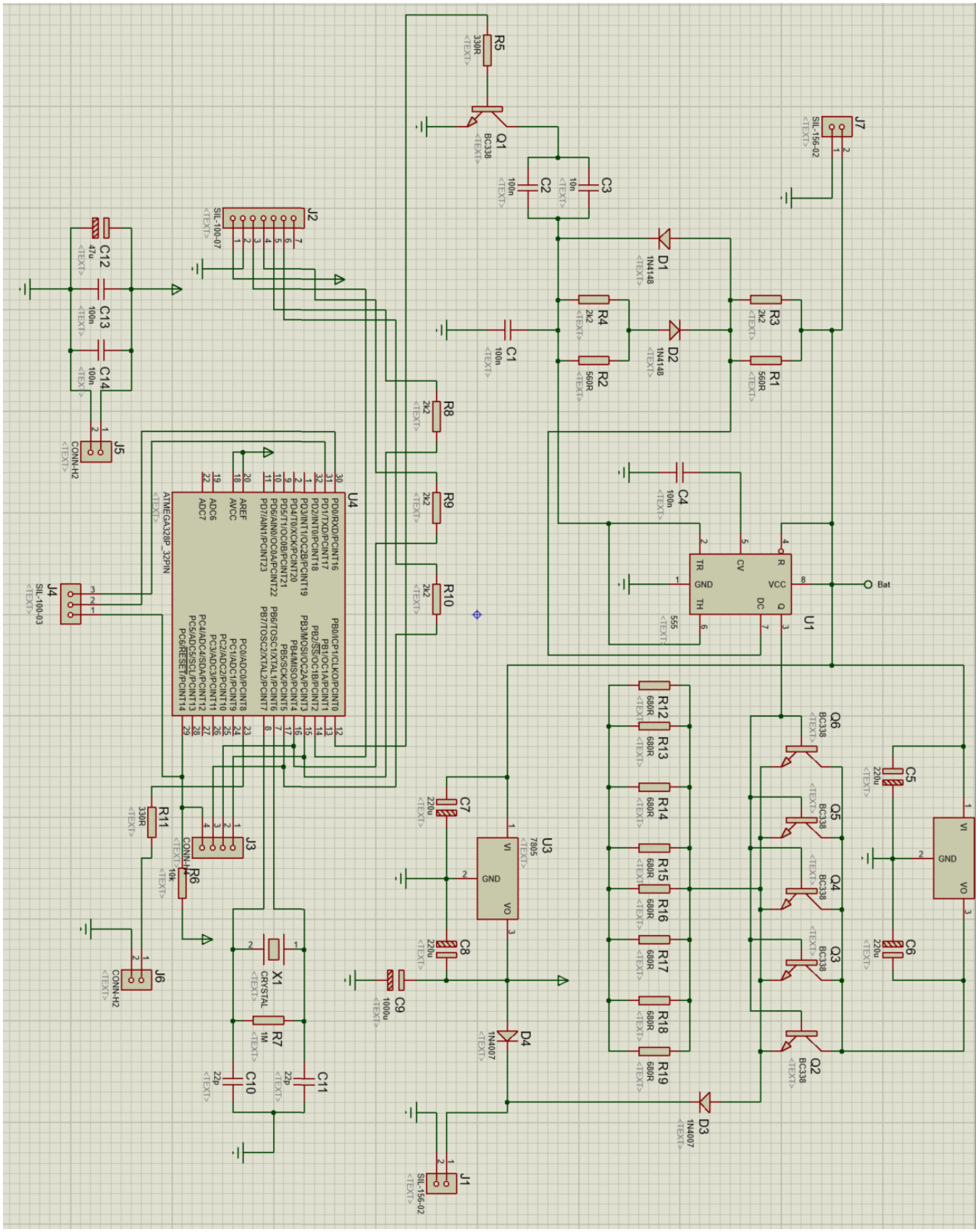


Figura 47: Circuito receptor primeira parte

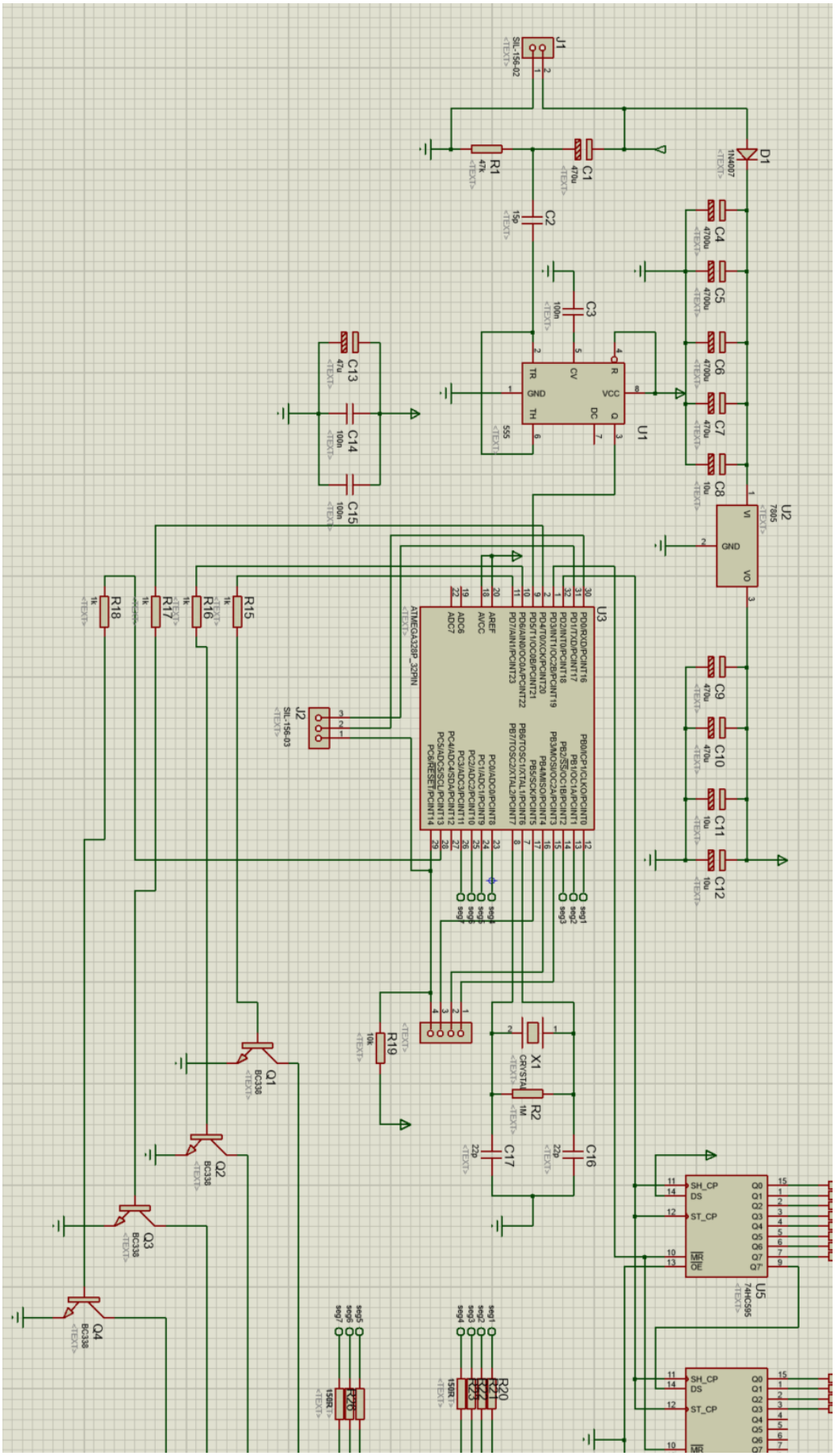


Figura 48: Circuito receptor segunda parte

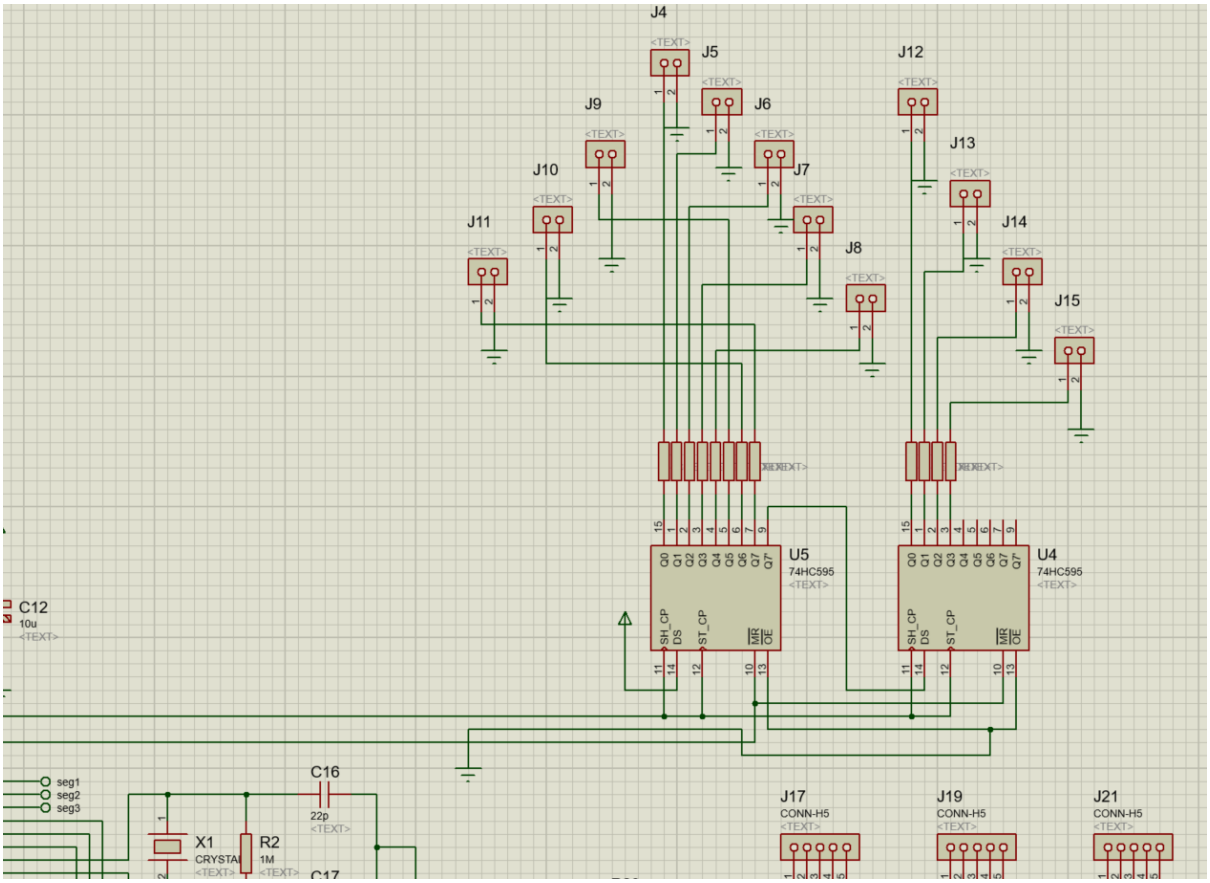
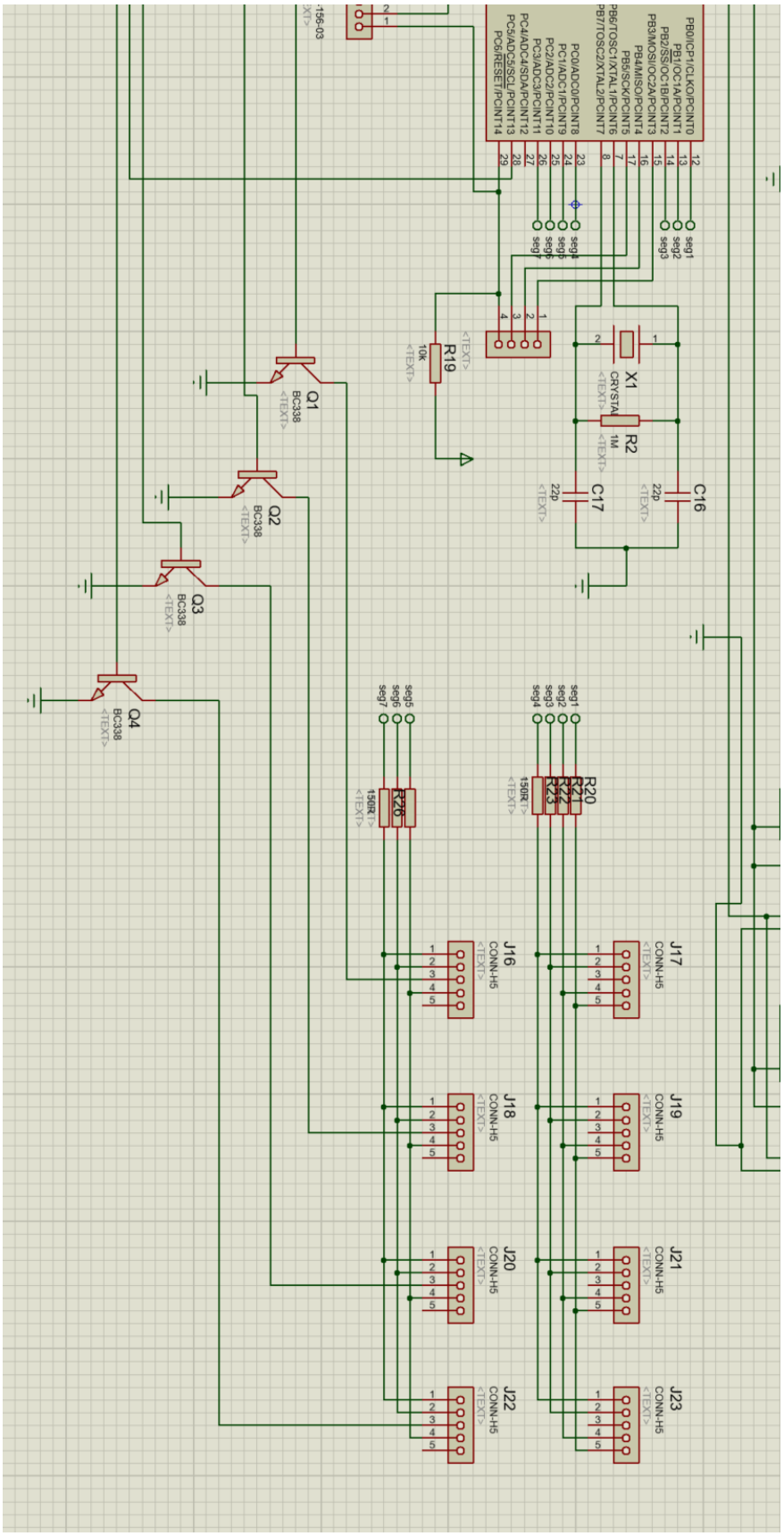


Figura 49: Circuito receptor terceira parte



APÊNDICE C - Listas de Materiais

Tabela 2: Lista de materiais do receptor

17 Capacitors		
Quantity	References	Value
3	C1,C9-C10	470u
1	C2	15p
1	C3	100n
3	C4-C6	4700u
1	C7	470u
3	C8,C11-C12	10u
1	C13	47u
2	C14-C15	100n
2	C16-C17	22p

26 Resistors		
Quantity	References	Value
1	R1	47k
1	R2	1M
19	R3-R14,R20-R26	150R
4	R15-R18	1k
1	R19	10k

5 Integrated Circuits		
Quantity	References	Value
1	U1	555
1	U2	7805
1	U3	ATMEGA328P
2	U4-U5	74HC595

4 Transistors		
Quantity	References	Value
4	Q1-Q4	BC338

1 Diodes		
Quantity	References	Value
1	D1	1N4007

24 Miscellaneous

Quantity	References	Value
1	J1	
1	J2	
1	J3	
12	J4-J15	LEDs
8	J16-J23	Display 7 seg
1	X1	CRYSTAL

Tabela 3: Lista de materiais do transmissor

14 Capacitors		
Quantity	References	Value
5	C1-C2,C4,C13-C14	100n
1	C3	10n
4	C5-C8	220u
1	C9	1000u
2	C10-C11	22p
1	C12	47u

19 Resistors		
Quantity	References	Value
2	R1-R2	560R
5	R3-R4,R8-R10	2k2
2	R5,R11	330R
1	R6	10k
1	R7	1M
8	R12-R19	680R

4 Integrated Circuits		
Quantity	References	Value
1	U1	555
1	U2	7809
1	U3	7805
1	U4	ATMEGA328P

6 Transistors		
Quantity	References	Value

6	Q1-Q6	BC338

4 Diodes

Quantity	References	Value
2	D1-D2	1N4148
2	D3-D4	1N4007

8 Miscellaneous

Quantity	References	Value
2	J1,J7	
1	J2	
1	J3	
1	J4	
2	J5-J6	
1	X1	CRYSTAL