

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO

Cássio Augusto Rosso

SOM ELETRÔNICO DE ESCAPAMENTO PARA CARRO
ELÉTRICO

Passo Fundo

2018

Cássio Augusto Rosso

SOM ELETRÔNICO DE ESCAPAMENTO PARA CARRO ELÉTRICO

Trabalho apresentado ao curso de Engenharia Elétrica, da Faculdade de Engenharia e Arquitetura, da Universidade de Passo Fundo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista, sob orientação do professor Dr. Carlos Alberto Ramirez Behaine.

Passo Fundo

2018

Cássio Augusto Rosso

Som eletrônico de escapamento para carro elétrico

Trabalho apresentado ao curso de Engenharia Elétrica, da Faculdade de Engenharia e Arquitetura, da Universidade de Passo Fundo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista, sob orientação do professor Dr. Carlos Alberto Ramirez Behaine.

Aprovado em ____ de _____ de ____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Orientador Carlos Alberto Ramirez Behaine - UPF

Prof. Dra. Blanca Rosa Maquera Sosa - UPF

Prof. Me. Edson Santos Acco - UPF

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Darcio e Miriam que sempre acreditaram em mim, por todo o carinho, compreensão, experiência e disposição a me ajudar.

Agradeço ao meu irmão Lucas pelo suporte e carinho que sempre teve comigo.

Agradeço aos meus colegas da turma 2014/1, em especial ao Braun, Maria, Jordenson, Marcos, Daniel, Danrlei e Emerson pelo companheirismo, amizade e troca de ensinamentos durante todo o período do curso.

Agradeço aos professores da Engenharia Elétrica da UPF por todo o conhecimento repassado ao longo desses anos, e em especial ao meu orientador professor Doutor Carlos Ramirez Behaine por ter me proporcionado um projeto que me cativasse, além de todo o tempo de ajuda que me disponibilizou.

Agradeço ao meu amigo Gilnei Lago Aires pela grande ajuda no desenvolvimento da parte estrutural do projeto.

“O valor das metas futuras não reside na imagem do futuro que se cria na mente, mas sim na mudança que elas provocam no presente”.

David Allen

RESUMO

A substituição do motor a combustão interna para o motor elétrico já está acontecendo nos grandes centros urbanos, possibilitado pelo notável crescimento da produção dos carros elétricos. Levando em conta essa ascensão, surgem diversas discussões sobre o risco potencial de acidentes a pedestres ocasionados por veículos elétricos devido a característica silenciosa dos mesmos, que tem seu barulho consideravelmente reduzido, pois dispensam do processo de combustão e provocam menos ruídos mecânicos se comparados aos motores tradicionais de combustão interna. Pensando nisso, neste trabalho foi desenvolvido um sistema eletrônico destinado a carros elétricos capaz de simular um som de carro a combustão. A geração do som é realizada pelo microcontrolador TM4C123GH6PM que contém ciclos do sinal digital desejado na memória. Esses sinais terão sua frequência de amostragem alterada em tempo real, provocando a simulação da aceleração e desaceleração da rotação de um motor. Até a etapa de reprodução sonora, o sinal passa pela conversão digital/analógica por meio de um DAC de 16 bits por protocolo SPI, filtro analógico de reconstrução e ajuste automático de volume por um potenciômetro digital. O parâmetro responsável por proporcionar essa variação no som é o nível de tensão obtido através de um pedal acelerador eletrônico. Para maior interação do sistema com o usuário, foi desenvolvido um aplicativo Android com comunicação via Bluetooth, por meio desse aplicativo é possível escolher qual som do veículo executar e opções de filtragem digital realizadas por filtro FIR.

Palavras chave: Frequência de amostragem, DAC, Carro Elétrico, Motor a Combustão, Acelerador Eletrônico, Som de motor, Sallen key, Filtro FIR.

ABSTRACT

The replacement of the internal combustion engine for the electric motor it's already happening in big urban centers due to the remarkable growth of electric cars production. Analyzing this rise, there are several discussions about the potential risk of pedestrian accidents caused by electric vehicles due to their quiet characteristics, which have considerably reduced noise because they dispense the combustion process and cause less mechanical noise compared to the traditional combustion engines. With this in mind in this work was developed an electronic system for electric cars capable of simulate a combustion engine sound. Sound generation is performed by TM4C123GH6PM microcontroller which contains cycles of the desired digital signal in memory. These signals will have their sampling frequency changed in real time, resulting in simulation of motor's rotation acceleration and deceleration. Until sound reproduction, the signal passes through digital/analog conversion by 16-bit DAC per SPI protocol, analog reconstruction filter and automatic volume adjustment by a digital potentiometer. The parameter responsible for providing this variation in sound is the voltage level obtained through an electronic accelerator pedal. For more system interaction with the user, an Android app was developed with Bluetooth communication. Through this app it's possible to choose which vehicle sound to perform and the digital filtering options by FIR filter.

Keywords: Sample frequency, DAC, Electric car, Combustion engine, Electronic throttle, Engine noise, Sallen key, FIR filter.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1. ILUSTRAÇÃO DO VIRABREQUIM E PISTÕES DE UM MOTOR.....	18
FIGURA 2. SISTEMA DE ESCAPE	19
FIGURA 3. EVOLUÇÃO DO ESTOQUE GLOBAL DE CARROS ELÉTRICOS	20
FIGURA 4. CURVA TÍPICA DE UM MOTOR ELÉTRICO NA RELAÇÃO TORQUE X POTÊNCIA.....	21
FIGURA 5. RUÍDO EM CARROS ELÉTRICOS	22
FIGURA 6. SENSOR DE POSIÇÃO NORMALMENTE ACOPLADO AO PEDAL ACELERADOR.....	24
FIGURA 7. ILUSTRAÇÃO DE UM SINAL EM TEMPO CONTÍNUO (A) E TEMPO DISCRETO (B).	25
FIGURA 8. ILUSTRAÇÃO DE DECIMAÇÃO NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA (SEM OCORRÊNCIA DE SUPERPOSIÇÃO OU "ALIASING". (A) - SINAL ORIGINAL (B) - SINAL DECIMADO POR $D=2$	26
FIGURA 9. EXPANSOR OU UP-SAMPLER NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA	27
FIGURA 10. DIAGRAMA DE BLOCOS FILTRO FIR.....	30
FIGURA 11. (A) - JANELA DE HAMMING (B) - ESPECTRO DE MAGNITUDE DA JANELA DE HAMMING	31
FIGURA 12: ESTRUTURA DE UM FILTRO IIR.....	32
FIGURA 13. LAUNCHPAD ARM CORTEX-M4F TM4C123G	35
FIGURA 14. RASPBERRY PI 3 MODEL B+.....	35
FIGURA 15. SINAL DE UM DAC APLICADO AO FILTRO DE RECONSTRUÇÃO.....	37
FIGURA 16. TOPOLOGIA Sallen Key	38
FIGURA 17. CURVAS DE FLETCHER E MUNSON	39
FIGURA 18. ESTRUTURA BÁSICA DE UM ALTO FALANTE DE BOBINA MÓVEL.....	39
FIGURA 19. VISÃO GERAL DO PROJETO.....	42
FIGURA 20. DIAGRAMA DE BLOCOS DO HARDWARE DO PROJETO	43
FIGURA 21. CIRCUITO PARA CONDICIONAR A TENSÃO NA FAIXA DO CONVERSOR A/D	44
FIGURA 22. DAC4811 - ESQUEMÁTICO SIMPLIFICADO	46
FIGURA 23. ESQUEMÁTICO POTENCIÔMETRO DIGITAL	47
FIGURA 24. CIRCUITO FILTRO Sallen Key PASSA BAIXA	48
FIGURA 25. MÓDULO BLUETOOTH HC-06	49
FIGURA 26. FFT SOM DE MOTOR APROXIMADAMENTE 1000 RPM FONTE: PRÓPRIO AUTOR	51
FIGURA 27. FFT SOM DE MOTOR APROXIMADAMENTE 2000 RPM	52
FIGURA 28. FFT SOM DE MOTOR APROXIMADAMENTE 3000 RPM	52
FIGURA 29. FFT SOM DE MOTOR APROXIMADAMENTE 4000 RPM	53
FIGURA 30. FLUXOGRAMA DO FIRMWARE DO MICROCONTROLADOR	55
FIGURA 31. SINAL DE ÁUDIO DE MOTOR COM ROTAÇÕES A (A) - 3000 RPM E (B) - 1000 RPM	56
FIGURA 32. COEFICIENTES OBTIDOS DO FILTRO FIR	59
FIGURA 33. MAGNITUDE E FASE FIR PASSA ALTAS.....	59
FIGURA 34. MAGNITUDE E FASE FIR PASSA BAIXAS	60
FIGURA 35. ESQUEMA DE COMUNICAÇÃO SÍNCRONA DO DAC8411	62
FIGURA 36. PARTE DE DESIGN DO APLICATIVO	64
FIGURA 37. PROGRAMAÇÃO EM BLOCOS APP INVENTOR	65

FIGURA 38. PROTÓTIPO DO PROJETO	66
FIGURA 39. PLACA CONFECCIONADA PARA O PROTÓTIPO.....	67
FIGURA 40. CONJUNTO DE ALTO-FALANTES PARA REPRODUÇÃO SONORA	67
FIGURA 41. APLICATIVO PRONTO.....	68
FIGURA 42. VARIAÇÃO DE TENSÃO NO CANAL A/D.....	69
FIGURA 43. SINAL MOTOR E30 VISTO NO SOFTWARE AUDACITY.....	70
FIGURA 44. SINAL MOTOR E30 REPRODUZIDO POR NOTEBOOK (REALTEK ALC255)	70
FIGURA 45. SINAL MOTOR E30 REPRODUZIDO PELO PROTÓTIPO.....	70
FIGURA 46. SINAIS GERADOS	71
FIGURA 47. FFT'S DOS SINAIS EM DIFERENTES POSIÇÕES DO PEDAL.....	73
FIGURA 48. TESTE FILTRO SALLÉN KEY	74
FIGURA 49. SINAL ANTES E APÓS FILTRO SALLÉN KEY	75
FIGURA 50. RESPOSTA FILTRO FIR	76

LISTA DE ABREVIATURAS

A/D – Analógico para Digital
ADC – Conversor Analógico para Digital
AmpOP– Amplificador operacional
BW– Largura de Banda (*Bandwidth*)
D/A – Digital para Analógico
DAC – Conversor Digital para Analógico
DSP – Processador Digital de Sinais
EUSART - *Enhanced/Addressable Universal Asynchronous Receiver Transceiver*
Fa – Frequência Analógica
FFT – Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform*)
FIR – Resposta Finita ao Impulso
FPA – Filtro Passa Alta
FPB – Filtro Passa Baixa
Fs – Frequência de Amostragem (*Sampling Frequency*)
GPIO - Portas programáveis de entrada/saída (*General Purpose Input/Output*)
I²C - *Inter-Integrated Circuit*
IIR – Resposta Infinita ao Impulso
I/O – Entrada/Saída (*Input/Output*)
IoT – Internet das Coisas (*Internet of Things*)
LAN - Rede de área local (*Local Area Network*)
LSB – Bit menos significativo (*Least Significant Bit*)
MSB – Bit mais significativo (*Most Significant Bit*)
P – Número de Bits
PWM – Modulação por largura de pulso (*Pulse Width Modulation*)
r - resolução
RPM – Rotações por minuto
SPI – Interface de Periférica Serial (*Serial Peripheral Interface*)
Ts – Período de amostragem (*Sampling Time*)
TI – Texas Instruments
UART – Transmissão/Recepção Universal Assíncrona (*Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 INTRODUÇÃO GERAL	13
1.2 OBJETIVOS	14
1.3 JUSTIFICATIVA	15
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	15
2 REVISÃO DA LITERATURA	16
2.1 CARRO A COMBUSTÃO INTERNA.....	16
2.1.1 Vibrações na área automotiva	17
2.1.1.1 <i>Vibrações e ruídos provenientes do motor</i>	17
2.1.2 Sistema de escape.....	18
2.2 CARRO ELÉTRICO	19
2.2.1 Classificação dos carros elétricos e características.....	20
2.2.2 Ruído do carro elétrico	21
2.2.3 Regulamentação sonora para carros elétricos	22
2.3 PEDAL ACELERADOR ELETRÔNICO	23
2.4 PROCESSAMENTO DE SINAIS EM TEMPO DISCRETO	24
2.4.1 Teorema da Amostragem.....	25
2.4.2 Decimação e Expansão	26
2.4.3 Análise no domínio da frequência.....	28
2.4.3.1 <i>DFT e FFT</i>	28
2.4.4 Filtros Digitais.....	29
2.4.4.1 <i>Filtro FIR</i>	29
2.4.4.2 <i>Filtro IIR</i>	31
2.4.5 Equalização de sinais de áudio	32
2.4.6 Plataformas para processamento digital de sinais.....	33

2.4.6.1 PIC.....	34
2.4.6.2 ARM-M4	34
2.4.6.3 RASPBERRY PI 3	35
2.5 CONVERSÃO DIGITAL-ANALÓGICA	36
2.5.1 Filtro de reconstrução	37
2.6 REPRODUÇÃO SONORA.....	38
2.6.1 Alto-Falante.....	39
3 DESENVOLVIMENTO.....	41
3.1 ESPECIFICAÇÃO DO PROJETO	41
3.2 HARDWARE	42
3.2.1 Pedal Acelerador Eletrônico.....	43
3.2.2 Microcontrolador.....	44
3.2.3 Conversor Digital-Analógico	45
3.2.4 Potenciômetro Digital.....	46
3.2.5 Filtro Sallen Key	47
3.2.6 Módulo Bluetooth	48
3.2.7 Alto-Falante.....	49
3.3 AQUISIÇÃO E ANÁLISE DE ÁUDIO	49
3.3.1 Fontes sonoras de um motor.....	50
3.3.2 Análise Espectral	51
3.4 FIRMWARE.....	54
3.4.1 Processamento das amostras	56
3.4.2 Equalização	57
3.4.2.1 Obtenção dos coeficientes.....	58
3.4.2.1 Filtragem.....	60
3.4.3 Comunicação com DAC8411	61
3.4.4 Timer – Intervalo entre amostras	62

3.5 APLICATIVO ANDROID.....	63
3.5.1 Design.....	64
3.5.2 Editor de blocos	65
4. RESULTADOS	66
4.1 RESULTADO A/D	68
4.2 SINAIS GERADOS	69
4.3 FILTRO SALLEN KEY.....	74
4.4 FILTRO FIR.....	75
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	77
REFERÊNCIAS	79
APÊNDICE A – ESQUEMÁTICO GERAL.....	82
APÊNDICE B – LAYOUT PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO.....	83
APÊNDICE C – FUNÇÃO DE INTERRUPÇÃO CANAL A/D.....	84
APÊNDICE D – EQUAÇÕES EM PROGRAMA DO TEMPO ENTRE AMOSTRAS...	85

1 INTRODUÇÃO

1.1 INTRODUÇÃO GERAL

Quando se trata de carros com propulsão a combustão interna, o som do motor que se ouve no escapamento é uma característica importante que mobiliza as montadoras a gerenciar equipes específicas responsáveis na criação da sonoridade do automóvel, seja direcionado a um lado mais potente e chamativo como em carros esportivos, quanto a um som mais suave para carros de passeio. A origem do “ronco” inicia-se com os movimentos dos pistões dentro dos cilindros gerando vibrações que deslocam o ar. O ruído sai pelo escapamento que contem abafadores e em alguns casos um ressonador para a absorção de determinadas frequências

Querendo tomar o lugar dos carros a combustão interna, a produção de carros elétricos está crescendo a uma taxa cada vez maior. O estoque de automóveis elétricos no mundo poderá chegar a 70 milhões de unidades em 2025, de acordo com o relatório Global EV Outlook 2017 (IEA, 2017). Vários governos adotam planos para proibir a venda de carros novos a diesel ou gasolina. A Noruega (país com maior participação de elétricos) pretende proibir a venda já em 2025 (MOURA, 2017). Analisando essa mudança, marcas renomadas como Volvo, Mercedes-Benz, BMW, Volkswagen entre outras já tem datas previstas para a extinção da produção de carros a combustão.

A transformação que o carro elétrico proporcionará será grande, desde o combustível para o funcionamento necessitando uma nova infraestrutura de estradas e postos de carregamento até o impacto nas cidades e mobilidade urbana devido ao motor silencioso.

A característica silenciosa do motor elétrico é um grande ponto nessa transformação e, aliado ao alto torque em praticamente todas as faixas de velocidade, sua aceleração rápida pode facilitar a ocorrência de acidentes a pedestres em geral, animais ou ciclistas.

Pensando nisso, uma forma de sintetizar um ronco de motor a combustão para ser reproduzido na parte externa de um veículo elétrico seria uma ótima alternativa para minimizar esse tipo de problema.

Visando principalmente o prazer do motorista, grandes montadoras já possuem sistemas internos de som no interior da cabine que reproduzem o som do motor. Basicamente, o funcionamento desse tipo de sistema se dá com sons do motor gravados previamente e disponibilizados no conjunto interno de áudio, responsável pela reprodução de acordo com a rotação e aceleração do motor.

Em 2012 a BMW anunciou o carro M5-F10 equipado com um reforço sonoro eletrônico denominado Active Sound, fazendo a reprodução do som do motor V8 bi turbo dentro do veículo, visto que o isolamento acústico no interior do carro impedia o condutor de escutá-lo. Também em 2012, a Renault lançou no mercado o R-Sound Effects para o Clio 4º geração, sistema que além de reforçar o som já existente, proporcionou ao motorista a opção de escolha de sons de outros veículos em sua central multimídia.

1.2 OBJETIVOS

Este projeto tem como propósito desenvolver um sistema eletrônico de reprodução de som de escapamento para carros elétricos, muito conhecidos por suas características silenciosas de locomoção. Esse sistema eletrônico fará a coleta da informação da posição do pedal acelerador eletrônico do automóvel, para então reproduzir o som do motor na faixa de rotação mais adequada, simulando um carro a combustão. Pela dificuldade de obtenção de um carro elétrico, a demonstração prática deste projeto se dará através de um pequeno protótipo contendo somente os itens necessários para o seu desenvolvimento. Os objetivos específicos do trabalho são:

- Coletar o parâmetro da posição do acelerador eletrônico para enviar ao microcontrolador.
- Analisar detalhadamente os espectros frequência dos sinais de áudio obtidos, a fim de conhecer como eles são compostos, facilitando a implementação do projeto.
- Sintetizar o som de um motor de carro a combustão interna em tempo real por meio de uma plataforma eletrônica utilizando técnicas de processamento digital de sinais. As amostras de áudio serão sincronizadas com a informação do acelerador eletrônico, visando a sensação auditiva de condução de um carro a combustão.
- Reprodução do som mantendo parâmetros de qualidade de áudio a 16 bits e saída mono, utilizando amplificador de potência e alto falante adequado para as frequências dos sinais.
- Desenvolvimento de uma interface gráfica com o usuário para realizar a troca de sons e algumas opções de equalização.

1.3 JUSTIFICATIVA

A crescente produção de carros elétricos no mundo já está causando transformações nas grandes cidades, sobretudo em países desenvolvidos. Como esses tipos de veículos emitem um som muito baixo principalmente em baixas velocidades, o risco de acidentes envolvendo pedestres torna-se muito maior pela redução da percepção auditiva de um carro se aproximando.

O maior perigo acontece em baixas velocidades e nas arrancadas, pois os carros elétricos possuem um alto torque de partida. A NHTSA (Nacional Highway Traffic Safety Administration), responsável pela administração rodoviária nos Estados Unidos, já regulamentou uma exigência de que todos os carros elétricos produzidos a partir de setembro de 2020 emitam de alguma forma sons de alerta para pedestres (NHTSA, 2016).

Portanto, com a utilização de um sistema que produza um som artificial de um carro a combustão, surge uma alternativa para a segurança dos pedestres, além de proporcionar o prazer em condutores que apreciam o “ronco” de motores, sobretudo o de carros esportivos de alta performance.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho divide-se em 5 capítulos. O primeiro capítulo engloba toda a parte de apresentação, motivos e justificativas para a realização do projeto. O segundo capítulo tem a função de introduzir ao leitor todo o conhecimento teórico (com temas abordados de diversos autores) necessários para o desenvolvimento do trabalho. O terceiro capítulo contém a especificação geral do projeto desenvolvido, com o diagrama de funcionamento do sistema eletrônico e retrata todas as etapas para seu desenvolvimento, incluindo hardware e firmware. Por último, são apresentados os resultados seguidos pelas considerações finais.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Nesse capítulo será abordada toda a revisão de literatura necessária para a compreensão e desenvolvimento do projeto. Os tópicos abordados iniciarão com algumas colocações e características sobre carros a combustão, carros elétricos e trânsito seguro para pedestres. A seguir serão tratados processamento digital e técnicas para análise de sinais. Também serão abordadas características sobre os componentes que serão utilizados no projeto, incluindo o acelerador eletrônico, plataformas para processamento digital e alto-falantes.

2.1 CARRO A COMBUSTÃO INTERNA

Os carros a combustão são os veículos propulsionados por motores de combustão interna. Essa propulsão ocorre pela transformação de energia térmica em energia mecânica ocasionada pela reação química de queima do combustível no interior do cilindro do motor. A partir da queima, a pressão interna dentro da câmara aumenta impulsionando os pistões para gerar o movimento (DA SILVA, RIBEIRO e DOS SANTOS, 2015).

Em 1860, o belga Etienne Lenoir (1822-1900) desenvolveu o primeiro carro a combustão interna, propulsionado a gás de carvão. Já em 1876 Nicolaus Otto (1832-1891) melhorou o motor, fazendo-o operar em quatro tempos. Essa operação em quatro tempos foi chamada mais tarde de “ciclo Otto”, que consiste basicamente na admissão do combustível, compressão da mistura, combustão e expulsão dos gases. (CAPELLI, 2010).

Com a necessidade da sociedade de locomoção rápida e o mínimo possível de esforço dos ocupantes, a popularização e comercialização do carro na história começou em 1885 com a invenção do primeiro carro a gasolina por Karl Benz (1844-1929). Décadas mais tarde Henry Ford (1863-1947) passou a fabricar automóveis em série. Um grande destaque foi o Ford-T, cujas vendas ultrapassaram 15 milhões de unidades entre 1908 e 1927. (CAPELLI, 2010)

Diferente do que era antigamente, o automóvel contemporâneo dispõe de características infinitamente superiores, graças as inovações no processo de produção e as sucessivas adaptações e melhorias tecnológicas que proporcionam aos ocupantes mais segurança, agilidade e conforto.

2.1.1 Vibrações na área automotiva

O som do motor é uma característica muito visada pelas montadoras no projeto de carros pela incorporação de engenharia de vibração, não só para garantir a integridade estrutural e operacionalidade funcional, mas também para alcançar necessários níveis de qualidade de passeio e conforto (SILVA, 2000).

De modo geral, Gerges (2005) considera que as principais fontes de vibrações e ruídos externos podem ser classificadas como:

- Vibrações e ruídos provenientes do motor.
- Vibrações e ruídos da caixa de câmbio.
- Ruídos provenientes do sistema de aspiração.
- Ruídos provenientes do sistema de exaustão.
- Vibrações e ruídos provenientes dos pneus.

2.1.1.1 Vibrações e ruídos provenientes do motor

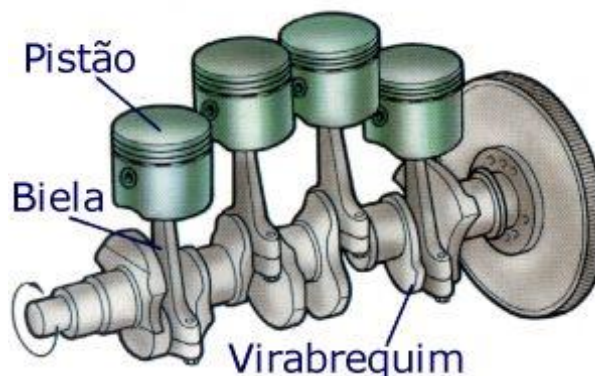
A vibração gerada pelo motor é sem dúvida a principal fonte de vibração e ruído do veículo, pois, é através do motor que as vibrações e ruídos são transmitidos para a carroceria e consequentemente sentidos pelos ocupantes do automóvel. As vibrações totais são produzidas principalmente através do processo de combustão e das forças mecânicas atuantes. (GERGES, 1992)

No processo de combustão, a vibração é gerada devido a reação de explosão da mistura de ar e combustível sob alta temperatura e pressão no interior da câmara de combustão. O tipo de combustível utilizado tem influência sobre esse tipo de ruído. (GERGES, 1992)

Para as vibrações mecânicas, que são consideradas de menor influência em relação às vibrações do motor, as contribuições mais importantes são dos pistões e válvulas. As vibrações provenientes dos pistões são causadas pelos impactos dos mesmos nas paredes dos cilindros, devidos seu movimento transversal ou inclinado. Já as vibrações geradas pelas válvulas podem ser causadas pelo contato metálico instantâneo entre suas áreas de vedação durante a abertura e fechamento. (GERGES, 1992)

A configuração e construção do virabrequim, ilustrado na Figura 1, é o que determina a ordem de disparo dos pistões e, por consequência, provoca pressões de emissão de gases diferentes no escapamento, tendo uma importância na caracterização final do ruído.

Figura 1. Ilustração do virabrequim e pistões de um motor



Fonte: ROSSINI, 2010

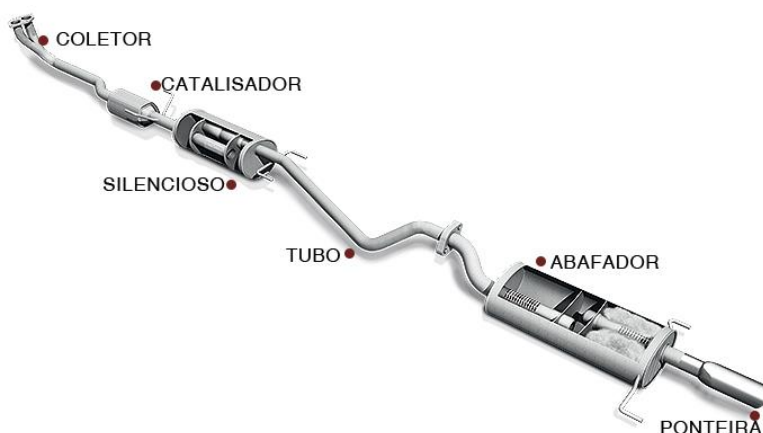
2.1.2 Sistema de escape

O escapamento é um conjunto de tubos que tem como finalidade coletar os gases da queima de ar/combustível e transferir para atmosfera evitando a perda de potência, o ruído, as vibrações e transferência de calor para a carroceria. Ele é constituído pelo coletor de escapamento, catalisador, tubo de escapamento, silencioso, abafador e ponteira. Essa estrutura pode ser visualizada na Figura 2. (OLIVEIRA e ROSA, 2003)

Tratando de ruído, o silencioso é uma câmara dotada de várias divisões internas por onde passam os gases. Ao passar por esse percurso, as ondas sonoras do ruído perdem pressão e esse processo resulta na redução do barulho gerado pelo funcionamento do motor. Já o abafador é um auxiliar do silencioso, encarregado de absorver os ruídos mais agudos. Esse sistema conta com três divisões no seu interior, que configuram uma espécie de labirinto formado por defletores. Ao jogar os gases de uma divisão para outra, o nível de ruído e as vibrações diminuem por causa do choque das ondas sonoras nas paredes internas do abafador. Geralmente o abafador é o último elemento no sistema de escapamento no automóvel (FONSECA, 2009).

O projeto do escapamento também é importante por proporcionar características acústicas específicas para cada carro de acordo com o desejo de cada montadora (GARATTONI, 2015).

Figura 2. Sistema de escape



Fonte: Disponível em (<https://www.blog.connectparts.com.br/escapamento-esportivo-como-funciona/>)

2.2 CARRO ELÉTRICO

O carro elétrico é um tipo de veículo que tem em sua tração total ou parcial a presença de um motor elétrico. O deslocamento das rodas ocorre devido a transformação de energia elétrica (provida de um banco de baterias) para energia mecânica ao rotacionar o rotor.

Segundo Barreto (1986), em 1837 na Inglaterra, foi construída a primeira carruagem elétrica. Portanto, quase 40 anos antes do primeiro automóvel de motor a combustão interna de Karl Benz, em 1886. A história dos carros elétricos está relacionada com a história das baterias. Em 1859, o belga Gaston Planté (1834-1889) realizou a demonstração da primeira bateria utilizando chumbo e ácido. Este equipamento veio a ser utilizado por diversos veículos elétricos que foram desenvolvidos a partir do início da década de 1880 na França, E.U.A. e Reino Unido.

Em 1901, Thomas Edison, interessado no potencial dos veículos elétricos, desenvolveu a bateria níquel-ferro, com capacidade de armazenamento 40% maior que a bateria de chumbo. No entanto, a falta de capacidade de armazenamento das baterias e o custo elevado de produção já eram considerados os pontos fracos do automóvel elétrico.

A partir de 1920, o carro a combustão passou a ser a tecnologia dominante pois superava a maioria dos problemas dos carros elétricos como autonomia e velocidade, além do baixo preço do petróleo. Os veículos elétricos passaram a ser produzidos em escala muito pequena, neste período a tração elétrica ficou quase que reservada aos meios de transporte em massa como ônibus, bondes e trens, e à movimentação de cargas industriais.

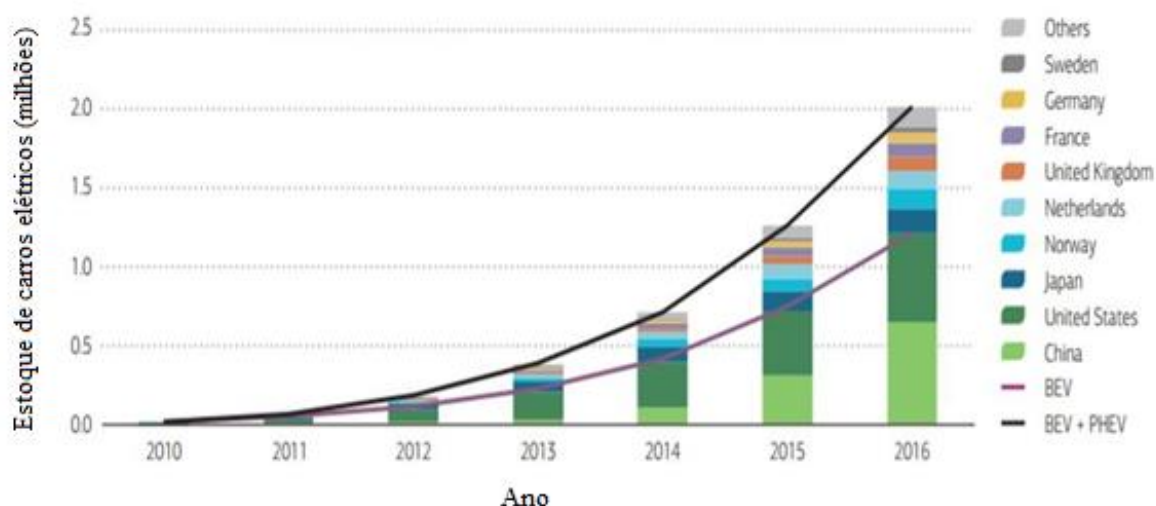
Recentemente o segmento de carros elétricos aponta um grande crescimento, como pode ser verificado na Figura 3, no relatório Global EV Outlook 2017, onde o número registrado do estoque global desses veículos subiu exponencialmente desde 2010 até 2016 com maior quantidade em países como China e Estados Unidos. Segundo a Globo, a frota mundial de carros elétricos cresceu 55% no ano de 2018 comparado a 2017 (WELLE, 2018). Esse crescimento deve-se a fatores como a preocupação ambiental, o preço do petróleo e a eficiência energética do mesmo.

2.2.1 Classificação dos carros elétricos e características

Os carros elétricos são classificados em:

- Puramente elétricos (BEV – Battery Electric Vehicle): dependem unicamente de energia elétrica como fonte de tração;
- Híbridos (PHEV - Plug-in hybrid electric vehicle): nesses modelos há a presença de um motor elétrico e um motor a combustão, os dois motores atuam em conjunto na produção de tração;

Figura 3. Evolução do estoque global de carros elétricos

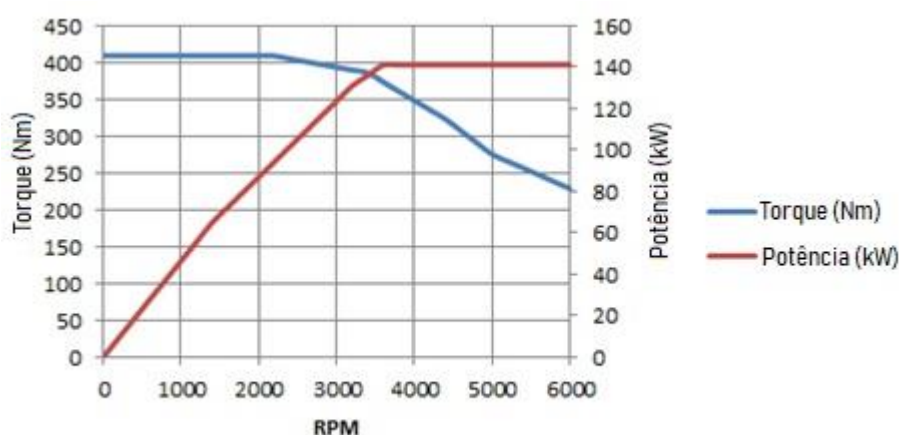


Fonte: Global EV Outlook, 2017

- Elétricos com extensão de autonomia: sua tração é produzida unicamente pelo motor elétrico, no entanto o sistema de gestão de energia do carro, ao detectar nível baixo das baterias, aciona um motor auxiliar de combustão interna para recarregá-las.

Conforme explica Fernandes (2007), os veículos elétricos normalmente usam transmissão motor-roda direta (direct motor-to-wheel configuration), sistema que possui uma única relação de velocidade, proporcionando ao condutor a sensação de sentir toda a força do carro. Isso deve-se ao fato da boa relação *Torque x Giro do motor* que pode ser observado na Figura 4.

Figura 4. Curva típica de um motor elétrico na relação torque x potência



Fonte: Disponível em (<https://impremedia.net/torque-curve-electric-motor/>)

Diferentemente de um motor a combustão, o torque em um motor elétrico atinge seu valor máximo no início da rotação e permanece relativamente constante até uma faixa aceitável de 6000 RPM, dispensando assim, a necessidade de usar uma caixa de mudanças até atingir a velocidade máxima. Essa boa relação entre torque e rotação do motor justifica o grande poder de aceleração que um carro elétrico pode ter.

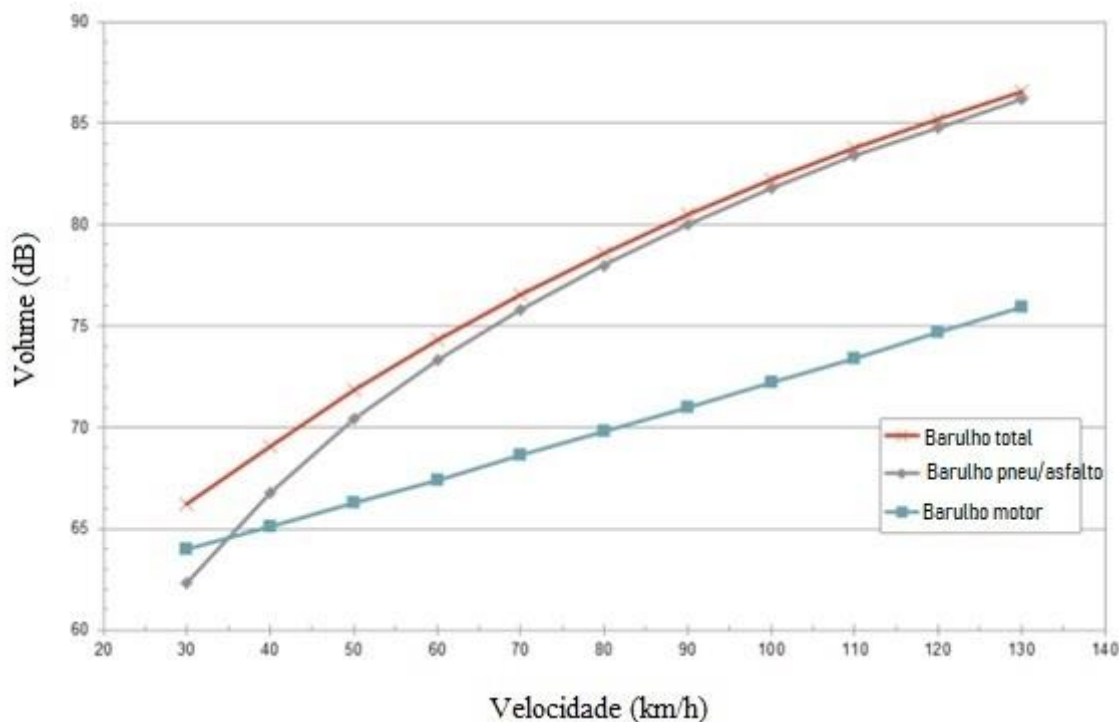
2.2.2 Ruído do carro elétrico

O baixo ruído é uma característica destacável nos motores elétricos. Como define Chapman (2013) os campos magnéticos constituem o mecanismo fundamental pelo qual a energia elétrica é convertida em energia mecânica. Essa natureza de funcionamento de motores elétricos proporciona uma suavidade maior na rotação se comparado a um motor a combustão, o qual possui elevado ruído devido a combustão interna e movimento dos pistões.

No entanto, de acordo com Marbjerg (2013), a redução efetiva do barulho que um carro elétrico proporciona é notável somente em baixas velocidades até aproximadamente 30 km/h, a partir dessa velocidade o barulho do pneu com o asfalto se sobrepõe de maneira significativa.

Porém, ainda assim, essa redução é relevante no tráfego de grandes cidades onde a velocidade média dos carros nas vias é baixa. Então, desde que um carro elétrico e um carro a combustão usem o mesmo conjunto de rodas e pneus, a tendência é que a partir de uma velocidade maior, o ruído total dos dois seja bem parecido, conforme é mostrado na Figura 5.

Figura 5. Ruído em carros elétricos



Fonte: Adaptado de Noise from electric vehicles: A literature survey (2013)

2.2.3 Regulamentação sonora para carros elétricos

Uma preocupação relativamente nova de órgãos e governos diz respeito a falta de sonoridade dos carros elétricos. Em 2013 a National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) iniciou uma discussão da necessidade desse tipo de carro de emitir algum som, principalmente em grandes cidades, onde a todo momento veículos estão acelerando, estacionando, em marcha ré ou circulando em baixas velocidades (ROSENFELD, 2015).

De fato, um pedestre pode sofrer grande perigo ao não ouvir nada próximo se aproximando. A necessidade de uma espécie de alerta sonoro nos carros é muito importante em locais urbanos com alta concentração de pessoas atravessando as ruas e ciclistas pedalando em ciclovias.

A alternativa preferida da NHTSA destaca que o som produzido pelo carro seja de um nível máximo de 55dB, pois considera esse nível um bom representativo de som em ambientes urbanos e suburbanos, além de ser um grau sonoro capaz de ser detectado principalmente por pessoas com deficiência visual.

Nos Estados Unidos, a NHTSA já deu o prazo para até setembro de 2020 todos os fabricantes equiparem seus veículos elétricos com alguma espécie de alerta para tornar as ruas mais seguras para os pedestres (NHTSA, 2016).

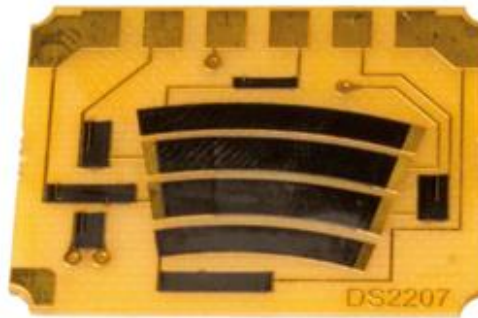
2.3 PEDAL ACELERADOR ELETRÔNICO

Os sistemas eletrônicos embarcados atualmente nos veículos estão se tornando cada vez mais complexos, o que exige maior confiabilidade de seus componentes. O pedal acelerador eletrônico é amplamente usado na indústria automobilística pela sua robustez e segurança no envio da informação, seja para uma central eletrônica de um carro a combustão realizar a injeção eletrônica, determinando com maior precisão o ponto da ignição na mistura ar/combustível. Seja para o controlador de um carro elétrico, onde o veículo necessita do sinal elétrico enviado pelo usuário através do acelerador para realizar o controle mais eficiente do motor.

Em sua grande maioria, os aceleradores eletrônicos são constituídos por um sensor de posição de origem resistiva, ou seja, um potenciômetro acoplado ao pedal. O sensor de posição mostrado na Figura 6 é parte da estrutura fixa do pedal, sobre estas resistências desliza uma escova metálica que é acionada por uma haste de tal modo que a posição angular do pedal seja convertida na tensão que resulta do divisor de tensão que o potenciômetro implementa.

Existem também outras tecnologias de aceleradores que evitam o atrito do conjunto mecânico, são os pedais de acelerador sem contato que fazem uso de sensores baseados no fundamento de campos magnéticos como o efeito hall. Embora essas tecnologias removam o problema de desgaste no atrito, elas ainda contam com um preço elevado se comparado ao pedal com sensor de posição.

Figura 6. Sensor de posição normalmente acoplado ao pedal acelerador



Fonte: Disponível em <<https://www.umec.com.br/sensor-pedal-acelerador-fiat-idea-2006-2013-191422-2207/p>>

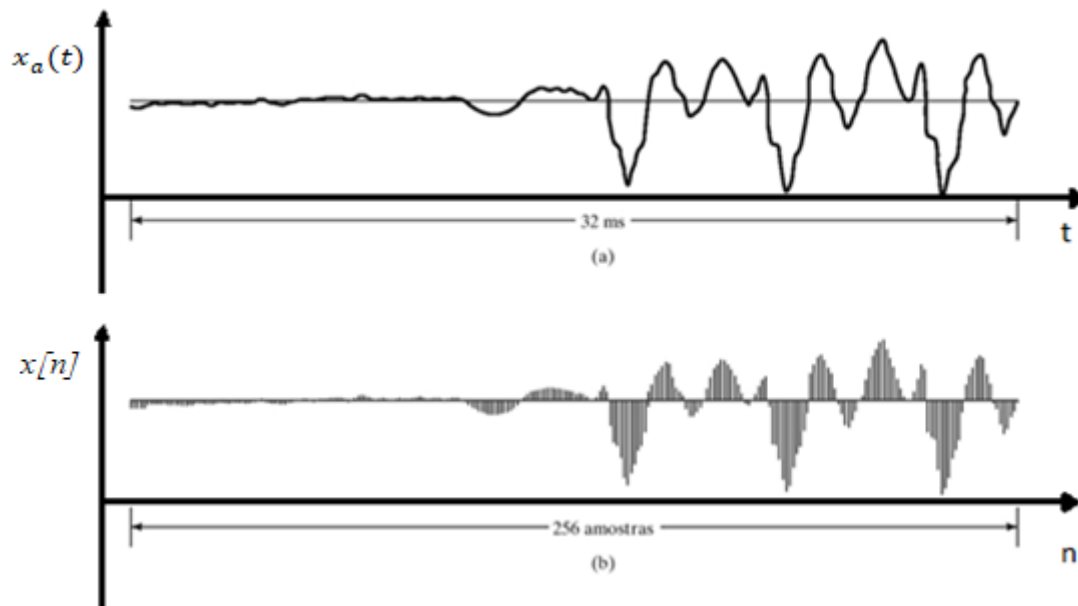
2.4 PROCESSAMENTO DE SINAIS EM TEMPO DISCRETO

O termo sinal pode ser entendido como algo que transmite informação, o qual é sintetizado com a finalidade de transmitir informação entre humanos ou humanos e máquinas. Embora os sinais possam ser de diversos tipos, matematicamente eles são descritos como funções de uma ou mais variáveis independentes, podendo ser discretos ou contínuos. Como ilustrado na Figura 7, os sinais contínuos são aqueles que possuem um estado definido em qualquer instante de tempo e os sinais discretos são definidos em instantes discretos, ou seja, a variável independente assume uma sequência discreta de números (DINIZ, DA SILVA e NETTO, 2014).

$$x[n] = x_a(nTs), \quad -\infty < n < +\infty \quad (1)$$

Da Equação (1), é representado uma sequência de números, onde o n -ésimo número na sequência é indicado por $x[n]$. Na prática, tais sinais surgem frequentemente da amostragem periódica de um sinal analógico $x_a(t)$. Assim, o valor que $x[n]$ assumir é igual ao valor do sinal analógico no instante nTs , onde Ts é o período de amostragem (PINHEIRO, MACHADO e FERREIRA, 2017).

Figura 7. Ilustração de um sinal em tempo contínuo (a) e tempo discreto (b).



Fonte: Adaptado de PINHEIRO, MACHADO e FERREIRA, 2017

2.4.1 Teorema da Amostragem

Também conhecido como taxa da amostragem de Nyquist, o teorema da amostragem indica que se um sinal é limitado em frequência, então ele é unicamente determinado por suas amostras, podendo ser reconstruído sem distorção se a frequência de amostragem (F_s) for no mínimo o dobro da frequência máxima do espectro (F_a) do sinal (NALON, 2013). A representação matemática pode ser visualizada na Equação 2.

$$F_s \geq 2 * F_a \quad (2)$$

Na prática, geralmente a frequência de amostragem é mais do que o dobro, por exemplo, para simplificar o projeto de filtros analógicos em operações de conversão A/D necessário para evitar frequências intrusas na faixa útil do sinal decorrentes dos efeitos da amostragem. Se a condição da equação acima não for satisfeita, então os espectros replicados se sobrepõem, e haverá distorção.

2.4.2 Decimação e Expansão

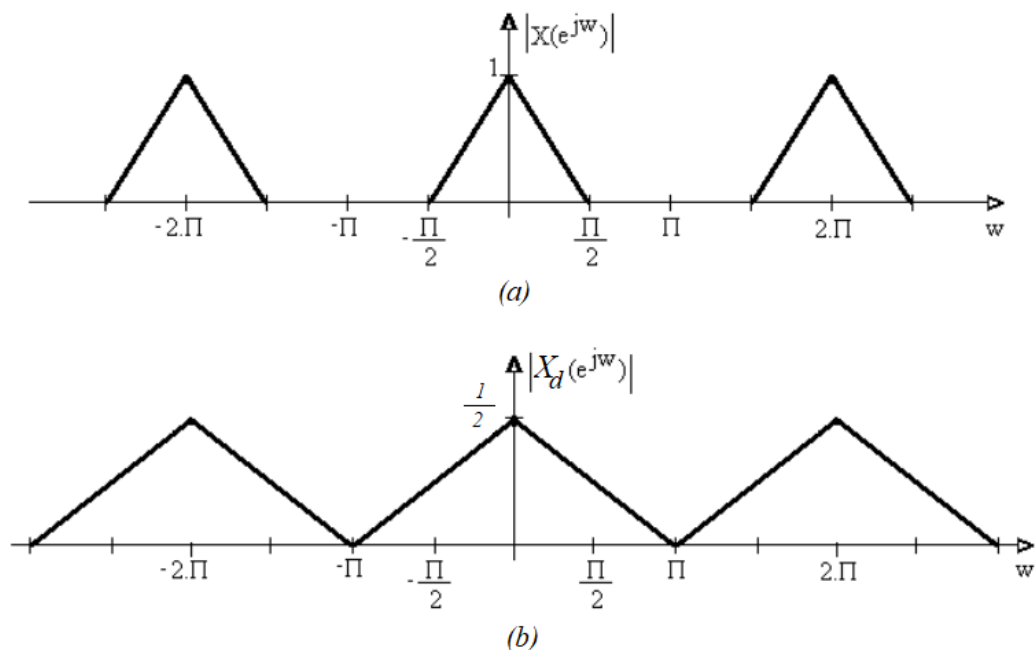
Decimação ou Downsampling é uma técnica de redução da taxa de amostragem. Um sinal $x[n]$ pode ser subamostrado por um fator D . Isso equivale a manter somente uma a cada D amostras do sinal. A relação entre o sinal decimado e o sinal original é, portanto:

$$x_d[n] = x[nD] \quad (3)$$

Onde D é um número inteiro. Apenas as amostras de $x[n]$ em que n é múltiplo de D são utilizadas pelo decimador. Por exemplo, se um conjunto de amostras for decimado por 2, a saída será gerada apenas com os valores de $x[n]$ para n par, ou n ímpar. Assim, terá a metade do número de amostras da sequência original, ou seja, a taxa de amostragem fica reduzida pela metade.

No domínio da frequência, conforme mostrado na Figura 8, o espectro do sinal $x[n]$ se alarga após a decimação, podendo ocorrer superposição ou “aliasing”. Este fenômeno ocorre quando o espectro do sinal original é maior que π/D . Quando ocorre a superposição, informações do sinal são perdidas, o que pode impossibilitar a sua reconstrução. Em geral, são usados filtros passa-baixa, com ganho unitário e frequência de corte em π/D (GUEDES, 2002).

Figura 8. Ilustração de decimação no domínio da frequência (sem ocorrência de superposição ou "aliasing"). (a) - Sinal original (b) - Sinal decimado por $D=2$.



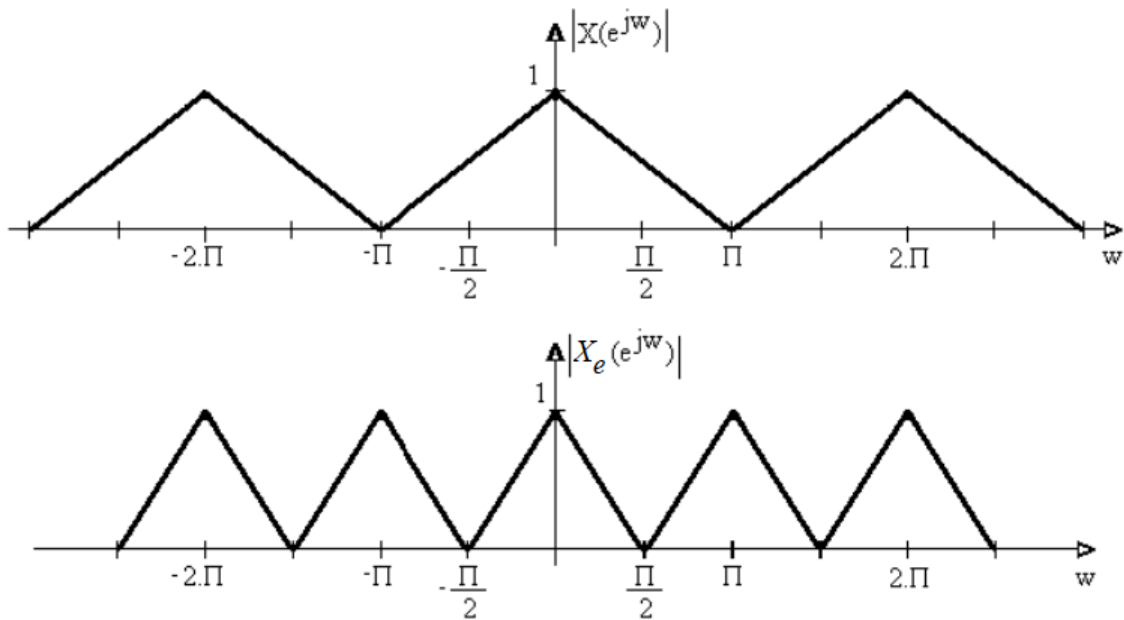
Fonte: Adaptado de GUEDES, 2002

Da mesma forma que existe a decimação, o inverso também ocorre com o expansor ou up-sampler, uma maneira de aumentar artificialmente a taxa de amostragem em D vezes bastando inserir um número $D-1$ de zeros entre as amostras originais do sinal. Para uma sequência de entrada $x[n]$, a saída será:

$$x_e[n] = \begin{cases} x\left[\frac{n}{D}\right], & \dots n = 0, \pm D, \pm 2D, \dots \\ 0, & \dots n \neq 0, \pm D, \pm 2D, \dots \end{cases} \quad (4)$$

O expansor terá na saída uma réplica de $x[n]$ se n for múltiplo de D , caso contrário, a saída gerada terá valor zero. Esse processo gera um espectro de frequência com imagens replicadas do espectro original como pode ser observado na Figura 9. Para obter o espectro original novamente, apenas com taxa de amostragem D vezes maior, normalmente é utilizado um filtro passa-baixa com ganho D e frequência de corte π/D após o up-sampler (GUEDES, 2002).

Figura 9. Expansor ou Up-sampler no domínio da frequência



Fonte: Adaptado de GUEDES, 2002

2.4.3 Análise no domínio da frequência

Qualquer sequência discreta pode ser escrita como uma soma de senoides de frequências apropriadas. Essa decomposição de um sinal em senoides componentes permite alterar a visualização da representação do mesmo do domínio do tempo para o domínio da frequência. Em frequência, torna-se possível a obtenção de informações do sinal que não são possíveis observar no domínio do tempo, tais como características de ruídos ou ecos. Assim, há a possibilidade de, por exemplo, atenuar as frequências indesejadas e amplificar as desejadas para um realce relevante de um determinado tipo de sinal (NALON, 2013).

2.4.3.1 DFT e FFT

A DFT (Discrete Fourier Transform) é a análise de Fourier de uma sequência de tempo discreto $x[n]$ (sendo ela não periódica com $-\infty < n < +\infty$) transformando-a em uma sequência que depende de uma variável discreta de frequência k . Este método possibilita a análise de sinais no domínio da frequência realizados computacionalmente por meio de algoritmos de análise (DINIZ, DA SILVA e NETTO, 2014).

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j2\pi kn/N} \quad (5)$$

$$k = 0, \dots, N-1; \quad n = 0, \dots, N-1;$$

Conforme a Equação (5), o sinal de entrada $x[n]$ com amostras de 0 até $N-1$, é multiplicada pela exponencial complexa, amostra por amostra, gerando o espectro computado $X[k]$ indicando dessa forma as amplitudes do sinal em cada componente de frequência.

Visando menor esforço computacional, existe a Transformada Rápida de Fourier (FFT), ela não é um tipo diferente de transformada e sim uma técnica que possibilita avaliar DFT de forma mais rápida e com menos operações. Segundo Oliveira (2012) destacam-se entre as aplicações da FFT: a determinação do espectro, realização de integrais de convolução, simulação de filtros e codificação de voz. A FFT pode ser usada no processamento digital de sinais e tem se mostrado muito atrativa.

2.4.4 Filtros Digitais

O processo de filtragem de sinais para seleção ou rejeição de determinadas frequências pode ser feito digitalmente. As amostras de um sinal (geralmente oriundas de uma informação analógica) são processadas a partir de coeficientes resultando em um sinal digital filtrado que posteriormente será convertido para um sinal de tempo contínuo. A função de um filtro depende de seu comportamento no domínio da frequência podendo ser passa-baixa, passa-alta, passa-faixa ou rejeita-faixa. Os filtros digitais são classificados como FIR (Frequency Impulse Response), resposta ao impulso finito e IIR (Infinite Impulse Response), resposta ao impulso infinito (DINIZ, DA SILVA e NETTO, 2014).

2.4.4.1 Filtro FIR

O filtro FIR caracteriza-se por possuir a saída do sistema nula quando se aplica um impulso na entrada. A estrutura de um filtro FIR é bastante regular e, uma vez definidos os coeficientes, o filtro pode ser completamente especificado (OPPENHEIM e SCHAFER, 2012). Matematicamente, são expressos como:

$$y[n] = \sum_{k=0}^{K-1} h_k x[n-k]; \quad (6)$$

$$n \geq 0; \quad k = 0, \dots, K-1;$$

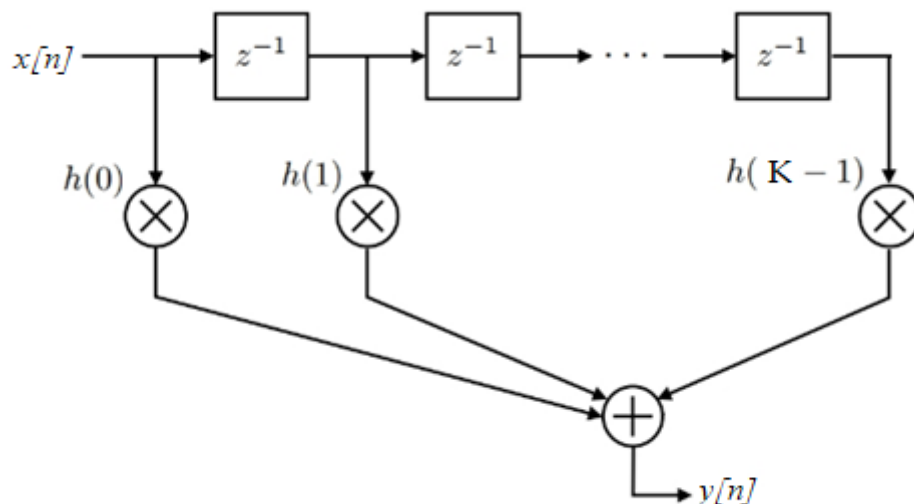
Nota-se então que na Equação (6), $y[n]$ representa os dados de saída do filtro (sinal filtrado) sendo o resultado do somatório de coeficientes finitos defasados no tempo. K é o número total de coeficientes h_k ($h_0, h_1, h_2 \dots$) determinando também ordem do filtro, quanto maior a ordem, maior é o número de contribuições previamente armazenadas na memória do processador para calcular a próxima componente. No diagrama de blocos da Figura 10 é possível observar a estrutura do filtro FIR, percebe-se que os coeficientes h_k são multiplicados pelos elementos z^{-1} que representam a diferença de instante na amostra de cada valor.

Dentre as vantagens desse tipo de filtro, pode-se destacar a facilidade de implantação, estabilidade inerente, facilidade em garantir a resposta em fase linear, e a ausência de erros

cumulativos que seriam gerados pela realimentação por não precisarem armazenar os valores de saída nem processar os valores anteriores a cada iteração.

Uma desvantagem dos filtros FIR é a elevada necessidade de capacidade computacional se for exigido muitos coeficientes para alcançar uma resposta em frequência específica, representando ainda, um elevado atraso total das componentes do sinal processado, da entrada para a saída do filtro.

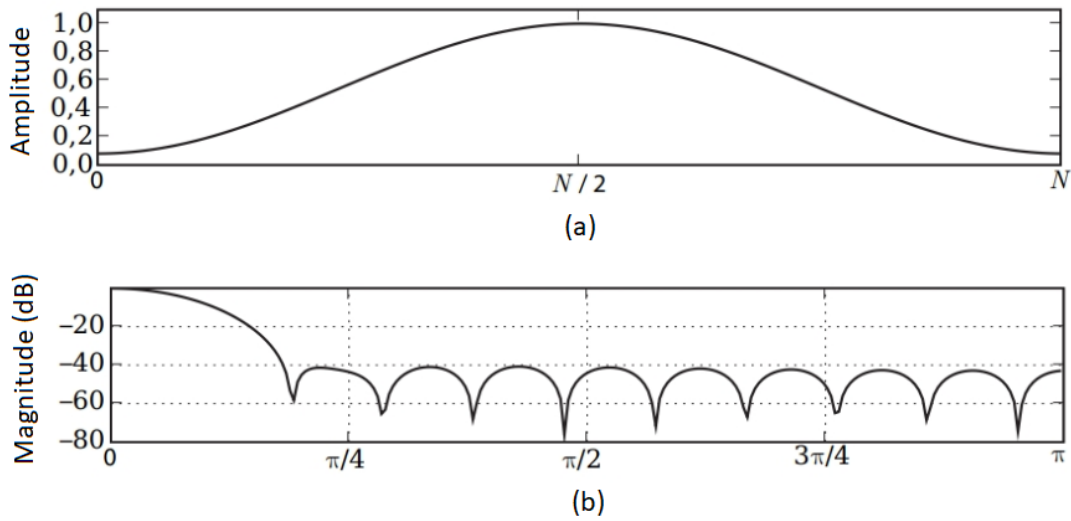
Figura 10. Diagrama de blocos filtro FIR



Fonte: Adaptado de Diniz, Da Silva e Netto, 2014

Uma forma bastante direta de se obter um filtro de duração finita é truncando a resposta ao impulso infinita de um filtro ideal. Esse método é chamado de janelamento e tem como função tornar a transição da banda passante para a banda de rejeição mais suave, e quanto maior for a ordem do filtro, menor será a faixa de transição e mais próximo ficará a um filtro ideal. Existem vários tipos de sequências usadas no janelamento para realizar a restrição de um filtro, como a de Hamming (representada na Figura 11), Blackman, Hanning entre outras (NALON, 2013).

Figura 11. (a) - Janela de Hamming (b) - Espectro de magnitude da janela de Hamming



Fonte: Adaptado de Nalon, 2013

2.4.4.2 Filtro IIR

A resposta de um filtro de Resposta Infinita ao Impulso (IIR) é função dos sinais de entrada presentes e passados, e dos sinais de saída passados. Ele utiliza uma realimentação das saídas anteriores no somatório dos coeficientes. A dependência das saídas passadas faz com que a duração da resposta seja infinita, mesmo quando cessarem os sinais de entrada. A equação a seguir retrata esse enunciado (CIRINO, 2007):

$$y[n] = \sum_{M=0}^{M-1} a_M \cdot x[n-M] - \sum_{k=0}^{N-1} b_k \cdot y[n-N]; \quad (7)$$

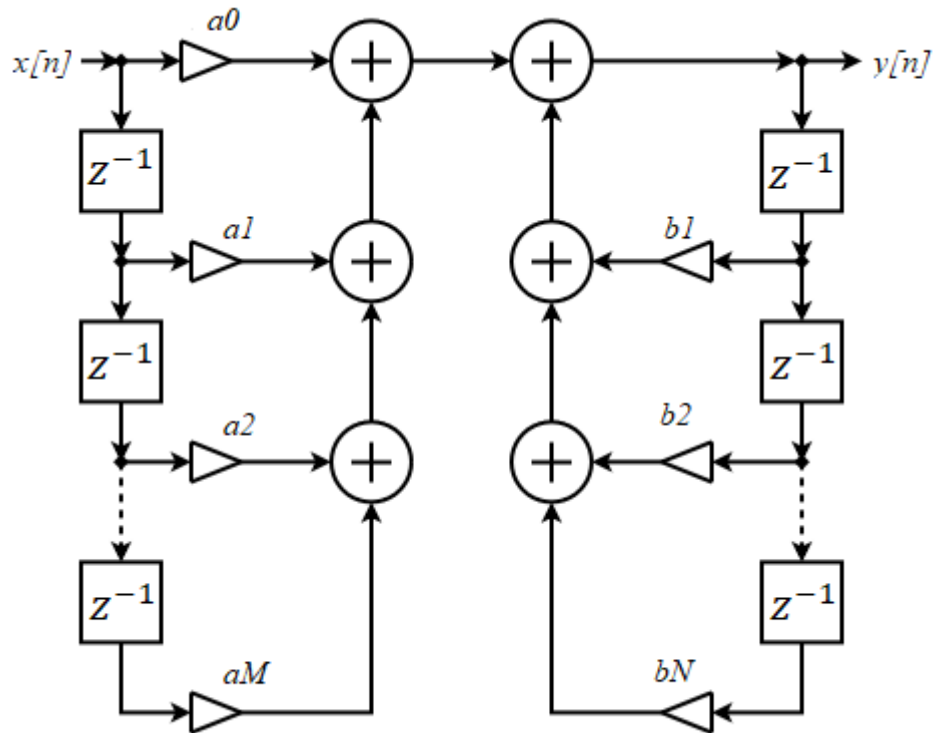
$$M = 0, \dots, M-1; \quad k = 0, \dots, N-1;$$

Através da Equação 7 pode ser observado a presença de dois tipos de coeficientes, isso acontece, pois, o filtro IIR depende das entradas representadas pelo somatório dos coeficientes a_M e da realimentação das saídas anteriores, denotado pelos coeficientes b_k , ou seja, há um componente recursivo neste tipo de filtro. Na Figura 12 é retratada essa realimentação na estrutura geral do filtro.

Para o projeto de filtros IIR, geralmente é feito uma aproximação aos filtros analógicos como o Chebyshev, o Butterworth e o Bessel. Em geral, esses filtros são capazes de aproximar uma resposta na frequência prescrita com um número de multiplicações menor que os filtros

FIR. Por esse motivo, filtros IIR podem ser mais adequados a algumas aplicações práticas, especialmente envolvendo processamento de sinais em tempo real.

Figura 12: Estrutura de um filtro IIR



Fonte: Adaptado de Diniz, Da Silva e Netto, 2014

2.4.5 Equalização de sinais de áudio

O termo equalização diz respeito ao ajuste dos graves, médios e agudos no contexto do espectro de frequências de um determinado sinal de áudio. Existem várias maneiras de realizar uma equalização de um sinal de áudio, tanto para um sinal de áudio analógico, quanto para um sinal de áudio digital. (SOUSA, 2004)

Equalizadores podem ser projetadas com filtros de pico (peaking), shelving, filtros de banda, filtros passa-alta e filtros passa-baixa.

Os filtros de pico são muito utilizados porque permitem que a frequência central especificada sofra a alteração de amplitude, no entanto, as frequências vizinhas também acabam aumentadas ou diminuídas em menor intensidade para que não haja transição brusca entre o sinal não equalizado e a frequência alterada. Essa largura da distribuição nas frequências vizinhas é determinada pelo fator de qualidade Q . A classificação dos equalizadores com filtros

de pico são divididas conforme o poder de controles de suas variáveis ou parâmetros (Q, frequência central e ganho) podendo ser equalizador paramétrico, equalizador gráfico e filtro de entalhe (notch). (SOUSA, 2004)

Os equalizadores projetados com filtro shelving formam uma curva a partir de uma frequência específica, para então atingir um patamar linear. Este filtro pode ser usado para atenuar ou dar ganho no sinal e normalmente é encontrado nos controles de treble (agudos) e bass (graves) de unidades de casa de áudio.

Os equalizadores mais simples são os formados por FPA para atenuar as frequências abaixo da frequência de corte e os FPB para atenuar as frequências acima da frequência de corte. Quase todos os filtros (analógicos e digitais) induzem a mudança de fase no sinal de saída do áudio, que pode causar problemas no mixing (combinação de sons em um ou mais canais).

2.4.6 Plataformas para processamento digital de sinais

Para o processamento digital de sinais de áudio em um firmware, é necessária alguma plataforma eletrônica para tal. Ao lidar com processamento de sinais digitais em tempo real, uma questão fundamental que surge é sobre o poder computacional necessário para realizar com efetividade o processamento em questão. Para isto, é necessário quantificar a velocidade e o desempenho do hardware utilizado e a relação destes com as necessidades de cada tipo de processamento proposto (BIANCHI, 2011)

As vantagens do processamento digital de sinais são:

- Programabilidade: possibilidade de mudanças de parâmetros sem troca de hardware, um filtro digital pode ser alterado facilmente;
- Estabilidade: podem ser programados para detectar e compensar variações das partes analógicas e mecânicas de um projeto completo;
- Redução de custos: requisitos de hardware, partes de precisão e ferramentas para o desenvolvimento;
- Facilidade de aplicação de algoritmos adaptativos;
- Realização de funções especiais: filtros de fase linear, síntese de voz, implementação de algoritmos de código de erros, transmissão e armazenamento de dados.

Os hardwares usualmente usados para esse tipo de aplicação incluem os microprocessadores, microcontroladores, FPGAs (Field Programmable Gate Array – Arranjo de Portas Programáveis em Campo) e DSPs (Digital Signal Processor – Processador Digital de Sinal).

No tópico seguinte serão abordadas algumas plataformas como o microcontrolador PIC, o microprocessador ARM-M4 e o microcomputador Raspberry PI 3, que são opções de baixo custo encontradas no mercado para processamento digital de sinais.

2.4.6.1 PIC

O PIC (Peripheral Interface Controller) ou controlador de interface periférica é um microcontrolador que se destaca por suas características provenientes de sua arquitetura, técnica de paralelismo, tamanho padrão das palavras de instrução e conjunto de instruções reduzido (tecnologia RISC). O baixo custo, a simplicidade e a disponibilidade das ferramentas e informações de apoio de desenvolvimento são outros motivos que fazem a família PIC popular.

O ciclo de instrução de um PIC é de 4 pulsos de clock e pode variar de 35 para mais de 80 instruções nos PIC's mais sofisticados. Eles podem processar dados de 8, 16 e 32 bits e trabalham com frequência de até 200MHz. As famílias de 16 e 32 bits possuem periféricos mais amplos como conversores A/D de maior resolução, PWM, funções de processamento digital de sinais como FFT e filtros, protocolos de comunicações seriais como SPI (Serial Peripheral Interface) e EUSART (Enhanced/Addressable Universal Asynchronous Receiver Transceiver).

2.4.6.2 ARM-M4

O processador ARM Cortex-M4 fornece alta performance, plataforma de baixo custo usando o mínimo de memória para implementação, baixo consumo de energia e excelente resposta no sistema de interrupções. Especificamente o ARM-Cortex-M4F (Figura 13) processa dados de até 32 bits e possui frequência de operação de 80MHz. Sua memória flash é de 256KB, além de prover uma memória EEPROM de 2KB.

Na parte de comunicações serial, este microprocessador pode trabalhar através de I²C (Inter-Integrated Circuit), UART (Universal Synchronous Receiver/Transmitter), USB (Universal Serial BUS) entre outras. Também contém periféricos como conversores A/D, módulos PWM e timers.

Figura 13. LaunchPad ARM Cortex-M4F TM4C123G



Fonte: Disponível em (<http://www.ti.com/tool/EK-TM4C123GXL>)

2.4.6.3 RASPBERRY PI 3

Com o objetivo de oferecer um computador por um baixo custo, a Raspberry PI Foundation reuniu acadêmicos, professores e demais admiradores da computação e lançou em 2012 o primeiro Raspberry PI modelo A.

O Raspberry é um microcomputador com todo hardware incluído em uma única placa oferecendo assim, uma alternativa acessível e prática para que qualquer pessoa possa explorar todas as capacidades da computação e incentivo a programação (Raspberry PI Foundation, 2016).

Atualmente o modelo Raspberry PI3 B+ mostrado na Figura 14 conta com algumas características destacáveis como o processador ARM-Cortex-A53 1.4GHz e 64 bits, 1GB RAM, portas USB, conectividade wireless LAN, ethernet e Bluetooth, além de possuir portas GPIO. Na parte de áudio há um conector de 3.5mm e uma porta HDMI para maior qualidade.

A linguagem de programação nativa do Raspberry PI é o Python e o mesmo é compatível com sistemas operacionais baseados em GNU/Linux e Windows 10 IoT (versão gratuita e adaptada).

Figura 14. Raspberry Pi 3 Model B+



Fonte: Disponível em (<https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b-plus/>)

2.5 CONVERSÃO DIGITAL-ANALÓGICA

Para as aplicações de processamento digital de sinais, muitas vezes torna-se necessário reconstruir um sinal analógico após o processamento. Para o processo de reconstrução é utilizado um conversor digital-analógico (digital to analog converter - DAC) que aceita em sua entrada uma palavra digital e converte-a para uma tensão ou corrente analógica. Os bits na entrada do DAC podem ser associados em série ou paralelo. Os DACs são comumente usados em leitores de música, convertendo sinais digitais para sinais analógicos de som.

Há muitas características na utilização de DACs, dentre elas, as mais importantes são:

- Faixa dinâmica: Condicionamento do sinal analógico de forma a possibilitar a máxima utilização na faixa de amplitude (tensão) do conversor.

- Resolução (bits): Menor quantidade que pode ser convertida (resolvida) dentro da faixa dinâmica do sinal de entrada, especificado pelo número de bits do conversor. Quanto maior o número de bits, menor é a resolução em volts possibilitando menor variação que pode ocorrer na saída analógica. Por intermédio da Equação (8) pode ser determinada a resolução r , onde V_{FS} (tensão fundo de escala) é a faixa dinâmica do sinal e P o número de bits do conversor:

$$r = \frac{V_{FS}}{2^P - 1} \quad (8)$$

- Linearidade: Medida do quanto o conversor real está próximo do ideal, obedecendo uma linearidade com o mínimo de erro de desvio.

- Tempo de conversão: Tempo correspondente que decorre entre uma mudança na entrada e a correspondente mudança na saída.

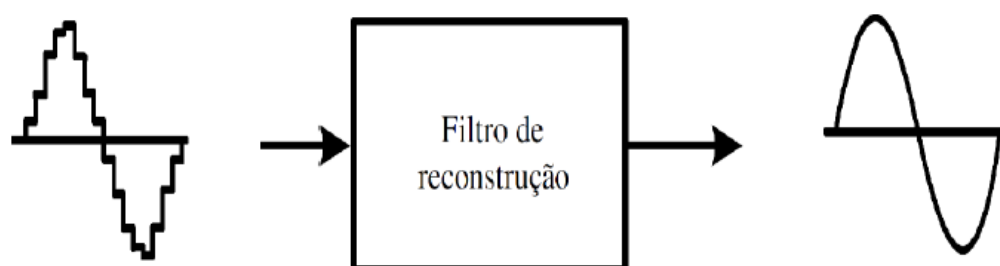
- Baixa sensibilidade a temperatura.

Mesmo existindo vários métodos para um DAC, o mais simples método é chamado de zero-order hold, no qual simplesmente mantem-se o valor de uma amostra até que o próximo valor é recebido. Esse período vai depender da frequência de amostragem. Devido à complexidade e a necessidade de equipamentos mais precisos, atualmente a maioria dos DACs utilizados estão na forma de circuitos integrados.

2.5.1 Filtro de reconstrução

Para aplicações de áudio, um filtro de reconstrução tem a função de capturar o sinal provindo de um DAC e fornecer em sua saída o sinal analógico reconstruído original, como é mostrado na Figura 15. Esses filtros são do tipo passa baixas e possuem frequência de corte (f_c) em geral como sendo a máxima frequência do espectro do sinal utilizado. Dessa forma, tudo que é acima da f_c é atenuado, como ruídos de alta frequência que podem surgir na entrada.

Figura 15. Sinal de um DAC aplicado ao filtro de reconstrução

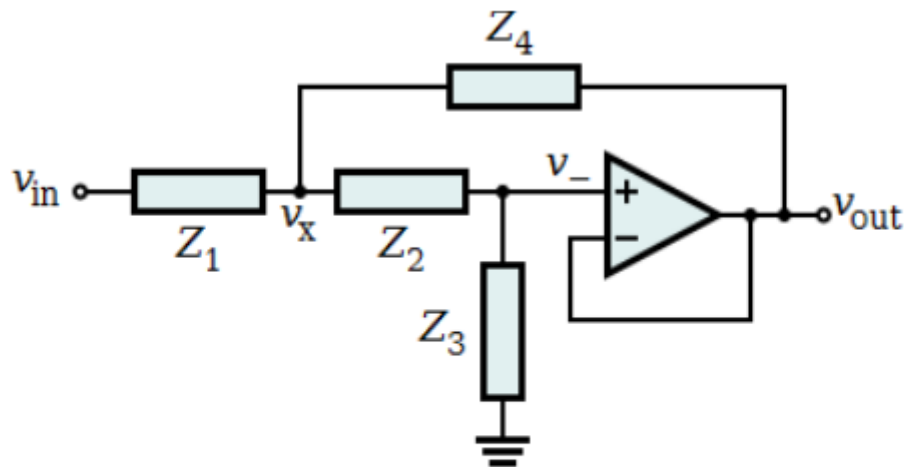


Fonte: Magalhães, 2015

A implementação dos filtros pode ser realizada de diversas formas diferentes: com componentes passivos (circuitos RLC), com amplificadores operacionais (filtros ativos), com circuitos de capacitores chaveado (filtros amostrados) e filtros digitais.

Dentre os filtros ativos a topologia mais comum é a Sallen Key representada na Figura 16 juntamente com sua função de transferência genérica (considerando AmpOp ideal). Escolhendo-se adequadamente as impedâncias pode-se facilmente implementar filtros passa-alta, passa-baixa e passa-faixa. Essa topologia é muito utilizada pois possui implementação simples, boa isolamento e pequeno tamanho para baixas frequências. Outra característica positiva em relação a outros filtros ativos é a menor dependência do desempenho do filtro em relação ao amplificador operacional utilizado. Pode possuir ganho unitário ou superior na faixa de passagem e apresenta estrutura básica formada por um AmpOP, dois resistores e dois capacitores considerando um filtro de segunda ordem (BONFIM, 2002).

Figura 16. Topologia Sallen Key



$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{Z_3 Z_4}{Z_1 Z_2 + Z_4(Z_1 + Z_2) + Z_3 Z_4}$$

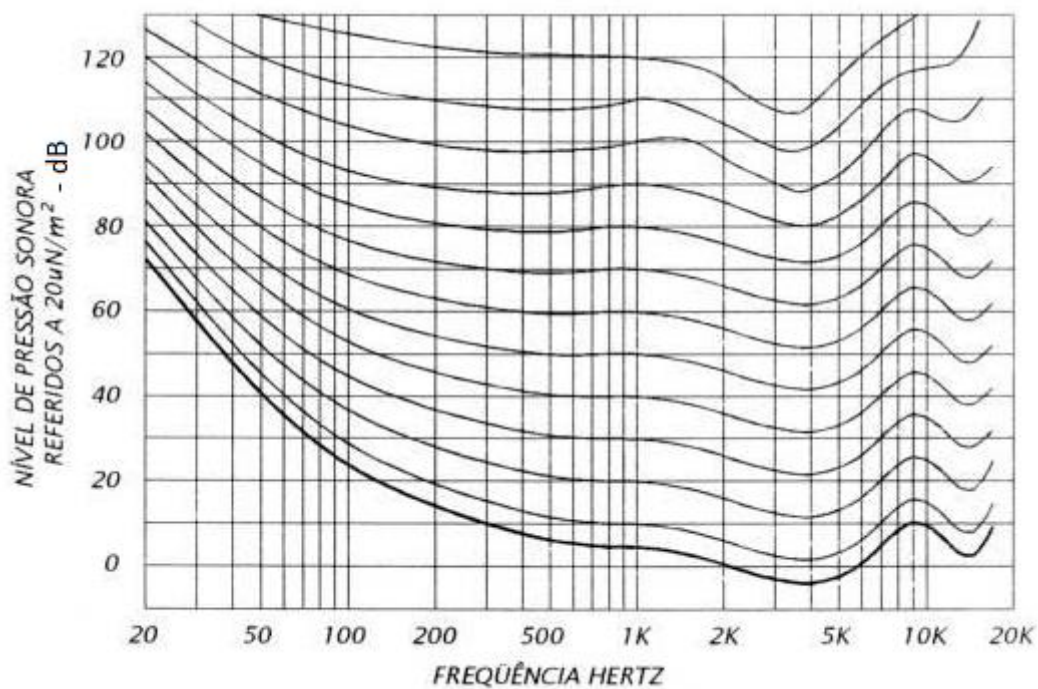
Fonte: Bonfim, 2010

2.6 REPRODUÇÃO SONORA

O som é uma onda mecânica que se propaga apenas em meios materiais como sólidos, líquidos ou gasosos. A percepção da propagação sonora se dá pela sensação auditiva criada pelo fenômeno acústico que consiste no deslocamento das ondas sonoras produzidas por um corpo que vibra em determinado meio material. Segundo Valle (2009, p. 47) a audibilidade humana está limitada a um intervalo que vai de 20 Hz a 20.000 Hz, podendo variar de acordo com a idade e a condição do ouvido do indivíduo.

No entanto, o ouvido humano não percebe sons graves, médios e agudos da mesma forma. Como a audibilidade é inerente a cada indivíduo, determiná-la depende de estudos estatísticos. Assim, várias pesquisas foram realizadas para determinar a sensibilidade média da audição em pessoas normais como o estudo feito por Fletcher e Manson em 1933. A partir do gráfico da Figura 17, na curva mais acentuada pode ser observado que um som entre 2kHz a 6kHz pode ser percebido com aproximadamente 0 dB enquanto que o mesmo som na frequência de 20Hz começa a ser percebido em torno de 70dB e acima dos 20kHz em torno de 10dB, evidenciando a perda de sensibilidade nos dois extremos da banda de frequência. A escala da intensidade sonora vai de 0dB (limiar da audição) até 120dB (limiar da dor)

Figura 17. Curvas de Fletcher e Munson

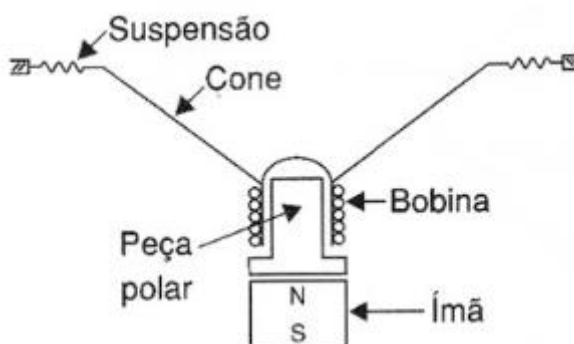


Fonte: Disponível em <https://www.somaovivo.org/artigos/o-decibelmetro-um-bom-companheiro/>

2.6.1 Alto-Falante

Os alto-falantes são transdutores que transformam a energia elétrica em energia acústica. O tipo mais comum é o alto falante de bobina móvel da Figura 18.

Figura 18. Estrutura básica de um alto falante de bobina móvel



Fonte: Disponível em (<http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/almanaque-tecnologico/190-a/7875-alto-falante-alm1010>)

A corrente elétrica representada pelo som ao percorrer a bobina gera um campo magnético que interage com o campo do ímã que está concentrado na peça polar. Dessa interação, a bobina (eletroímã) e o cone deslocam-se surgindo então a vibração que reproduzirá exatamente a forma de onda do sinal aplicado. Nesse movimento de compressão e descompressão do ar, produzem-se as ondas sonoras (DICKASON, 2006).

Na estrutura do alto falante o cone deve ser rígido o suficiente para que não se deforme em grandes oscilações, podendo ser desenvolvido em plástico, fibra de carbono, kevlar ou cerâmica. O seu tamanho e constantes da mola de sua estrutura vibrante definem a faixa de operação em frequência. Como é muito difícil um alto falante reproduzir toda a faixa audível de 20Hz a 20kHz, ele tem diferentes classificações:

- Woofers: são alto falantes que reproduzem sons graves entre 70Hz e 3kHz. Possuem bobina com capacidade para dissipar altas potências e o cone rígido com grande excursão.
- Sub-woofer: é um tipo especial de woofer, otimizado para reproduzir graves entre 20Hz e 150Hz. É dotado de um cone mais espesso que o woofer, isso deve-se ao fato de necessitar de mais rigidez devido a maior pressão de ar característica em sons ainda mais graves.
- Tweeter: específico para reprodução de agudos acima de 5kHz. Seu tamanho é inferior e sua reprodução é mais direcional pelo fato de que ondas sonoras de maior frequência possuem comprimento de onda menor sendo mais fácil de ser absorvido pelos objetos e meio de propagação.

Comercialmente, os alto falantes vêm especificados em potência e impedância. A potência medida em watts (W) é o máximo que o dispositivo suporta levando em conta a especificação do fio da bobina e a rigidez do cone. A impedância é dada em valor nominal e é medida em ohms (Ω).

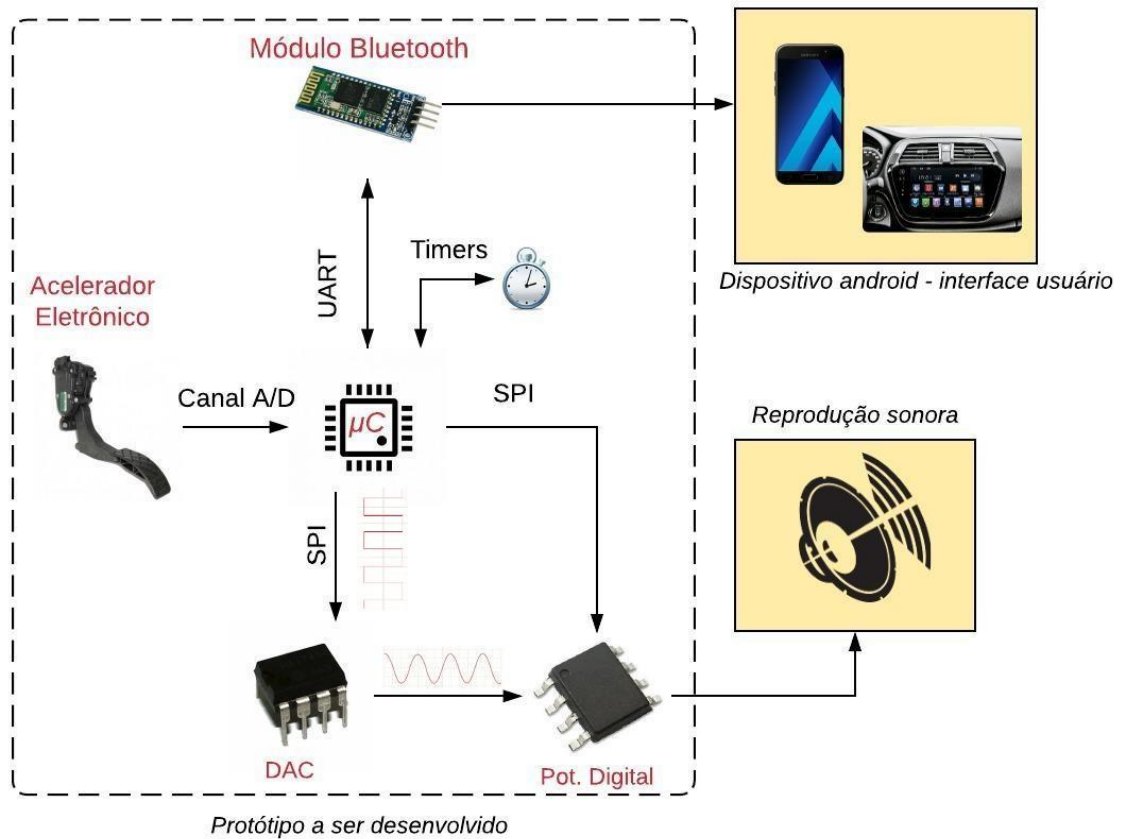
3 DESENVOLVIMENTO

O projeto em questão tem como foco a simulação de áudio de motores a combustão através da geração de sinais amostrados em um microprocessador. Esse sistema surge como uma alternativa futura para tornar mais notória a presença dos carros elétricos que circulam pelas vias, visto que o aspecto silencioso desse tipo de veículo pode aumentar o risco de acidentes. Dessa forma espera-se que uma fonte sonora de um carro a combustão contribua para chamar atenção de pedestres e, conseqüentemente, diminuir a chance de acidentes. Nessa seção será apresentado a especificação do projeto, análise de sinais, hardware utilizado e o firmware desenvolvido.

3.1 ESPECIFICAÇÃO DO PROJETO

De forma geral, as etapas do projeto estão demonstradas no diagrama da Figura 19. Inicialmente, chegará ao canal A/D do microcontrolador a informação do nível de tensão do acelerador eletrônico. No microcontrolador serão processadas amostras de períodos de sinais de áudio de motor a combustão condizentes com a força exercida no pedal acelerador. Nessa etapa de processamento serão utilizadas técnicas de processamento digital baseadas na decimação, expansão e equalização. Com o áudio produzido, o sinal passará por um estágio de conversão digital/analógico composto por um DAC de 16 bits e após, passará por um filtro Sallen-Key passa baixas de 3ª ordem para a reconstrução analógica e reprodução sonora. Ainda, haverá uma interface gráfica com o usuário através de um módulo bluetooth e aplicativo android para escolher opções de sons e equalização.

Figura 19. Visão geral do projeto

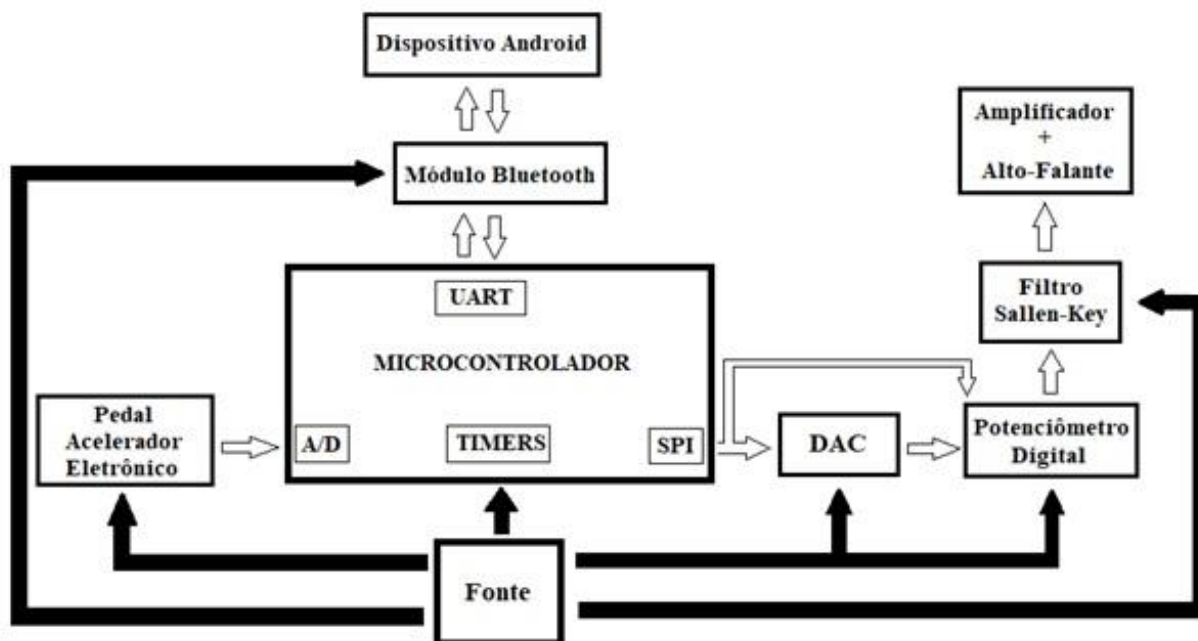


Fonte: Próprio autor

3.2 HARDWARE

Na Figura 20 está retratado o diagrama de blocos geral do hardware utilizado no projeto. Os blocos estão aprofundados nos tópicos seguintes.

Figura 20. Diagrama de blocos do hardware do projeto



Fonte: Próprio autor

3.2.1 Pedal Acelerador Eletrônico

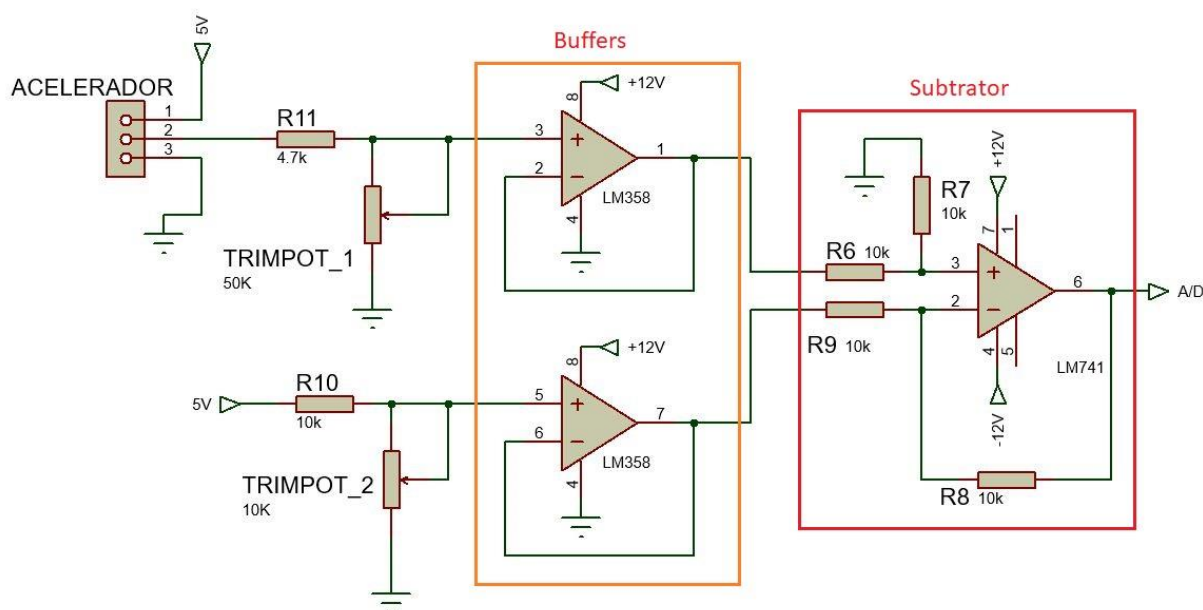
O acelerador eletrônico, também conhecido como *Drive by Wire*, é responsável por enviar a informação do nível de tensão para o canal A/D do microcontrolador ao ser pressionado. Esse componente possui um sensor de posição constituído por dois potenciômetros alimentados por 5V. A tensão de saída do primeiro potenciômetro varia de 0,79V a 5V, dependendo da posição do pedal do acelerador. Para o projeto, somente esse primeiro potenciômetro foi utilizado.

Levando em conta que o periférico A/D do microcontrolador aceita uma faixa de tensão que varia de 0 a 3,3V, foi necessário montar um circuito para condicionar a tensão de saída do pedal a esse limiar, visto que através de testes feitos em bancada, foi constatado que o pedal disponível ao autor possuía uma variação de 0,79V em posição ociosa até 4,9V ao ser totalmente pressionado.

O circuito em questão está exposto na Figura 21 e sua função basicamente é subtrair a tensão proveniente do pedal pela tensão do divisor resistivo formado pelo resistor R10 e pelo Trimpot_2. Esse divisor foi ajustado para obter um nível de aproximadamente 0,79V, ou seja, quando o pedal não estiver pressionado a tensão na saída equivalerá a aproximadamente 0V. Porém a subtração não será exatamente 0V devido ao divisor resistivo R11 e Trimpot_1, responsável por reduzir a tensão proveniente do acelerador para em torno dos 4,09V, para

quando ele for totalmente pressionado, a tensão de saída seja 3,3V ($4,09 - 0,79 = 3,3V$). O periférico A/D possui um sistema de corte quando houver saturação nos extremos, dessa forma, para a pequena variação que haverá em torno dos 0V, não haverá diferença significativa no uso prático do sistema.

Figura 21. Circuito para condicionar a tensão na faixa do conversor A/D



Fonte: Próprio autor

Para fazer a diferença de tensões foi usado o CI LM741 em modo subtrator e ganho unitário, e para o amplificador não observar uma impedância de entrada diferente nessa operação de subtração, foi utilizado seguidores de tensão (buffers) com o LM358 entre o circuito subtrator e os divisores de tensão.

3.2.2 Microcontrolador

Para o presente projeto foi escolhido o microcontrolador ARM-M4F, presente na placa de desenvolvimento da Texas Instruments (Tiva Launchpad TM4C123) programável em linguagem C. Características como bom clock de processamento para execução de cálculos no menor tempo possível, disposição de protocolos de comunicação e periféricos, e praticidade para compilação de programas com o cabo USB plugado direto no computador tornaram essa plataforma uma excelente escolha. Além da disponibilidade e a boa experiência do autor com o dispositivo.

O ARM foi programado para coletar o nível de tensão do pedal acelerador eletrônico e, dessa forma, realizar todas as tarefas envolvendo processamento digital de sinais. Para isso, necessitou-se de seu módulo ADC, comunicação UART e SPI com os demais componentes e poder de processamento para executar a variação da frequência do sinal em tempo real. Os temporizadores (ou timers) do mesmo também foram de essencial importância. Sua utilização ficou dentro do aceitável para o projeto.

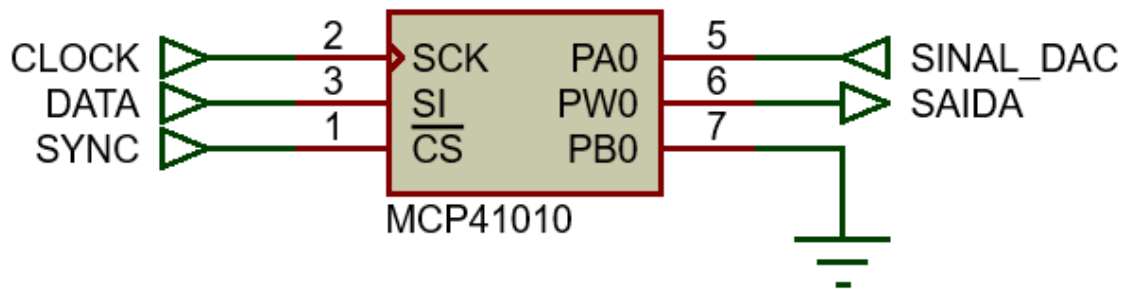
3.2.3 Conversor Digital-Analógico

Pelo fato do microcontrolador não possuir um periférico DAC para realizar a conversão, foi adquirido o circuito integrado DAC8411 da Texas Instruments. Esse componente tem resolução com 16 bits, excelente linearidade na conversão, taxa de atualização podendo chegar em até 50Mhz e interface SPI. Esse CI também apresenta seu pino de referência junto com o de alimentação (2V até 5.5V) garantindo uma operação rail-to-rail (TEXAS_INSTRUMENTS, 2015). Portanto sua resolução r com $V_{ref}=5V$ é dada pela Equação 9:

$$r = \frac{5V}{2^{16} - 1} = 76,295 \mu V \quad (9)$$

O esquemático do componente pode ser visualizado na Figura 22, seu método de conversão usa uma rede de resistores (*Resistor Network*) controlados por lógica dependendo do valor carregado no registro do DAC. A saída em tensão é ligada a um amplificador buffer. A comunicação SPI com o microcontrolador é feita usando somente 3 fios. Vale ressaltar que embora o dispositivo tenha resolução de 16 bits, o seu registrador interno possui 24 bits, neste caso foi necessário fazer uma manipulação de bits e envio em pacotes separados para que a informação fosse enviada corretamente sem invalidá-la. O processo de envio será explicado na seção *firmware*.

Figura 23. Esquemático potenciômetro digital



Fonte: Próprio autor

3.2.5 Filtro Sallen Key

O filtro sallen key foi utilizado por dois motivos. O primeiro é limitar a banda de frequência dos sinais de áudio de motores que tem por característica ser de baixa frequência eliminando assim qualquer ruído que possa surgir. O segundo é a atuação como filtro de reconstrução necessário para tirar os “passos” ou degraus do sinal gerados pela conversão dos bits em sinal analógico. A frequência de corte escolhida do filtro foi em torno de 15kHz, pois essa é a frequência máxima aparente no espectro dos sinais que serão utilizados, além de estar abaixo da taxa média de atualização das amostras no projeto que fica em torno de 36kHz, suprimindo assim qualquer possibilidade de degrau no sinal.

O filtro de terceira ordem foi projetado usando a combinação dos filtros de primeira e segunda ordem considerando ganho unitário $V_o/V_i=1$ e coeficiente de amortecimento (ζ) de 0,5 seguindo a equação de transferência abaixo (OKAWA, 2004):

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{(2\pi f c_1)}{s + (2\pi f c_1)} * \frac{(2\pi f c_2)^2}{s^2 + 2\zeta(2\pi f c_2)s + (2\pi f c_2)^2} \quad (11)$$

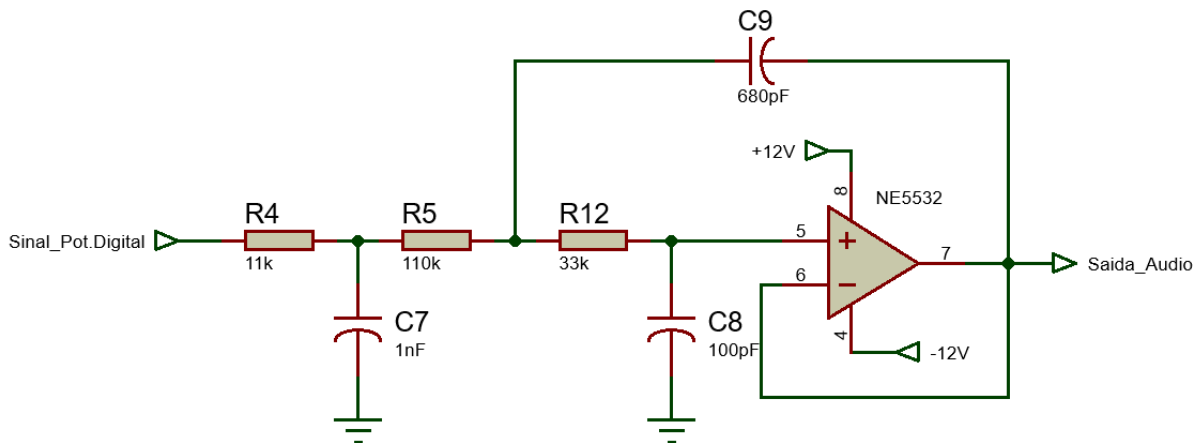
As frequências de corte resultantes são $f_{c1}=14880Hz$ e $f_{c2}=14570Hz$. Essas frequências contornam o ponto de -3dB da frequência central de corte. A função de transferência final do filtro é demonstrada abaixo:

$$G(s) = \frac{1}{s^3 + s^2 \left(\frac{1}{C_1 R_1} + \frac{1}{C_1 R_2} + \frac{1}{C_2 R_3} + \frac{1}{C_2 R_2} \right) + s \left(\frac{C_1 C_2 C_3 R_1 R_2 R_3}{C_2 C_3 R_2 R_3} + \frac{1}{C_1 C_2 R_2 R_3} + \frac{1}{C_1 C_2 R_1 R_3} + \frac{1}{C_1 C_2 R_1 R_2} \right) + \frac{1}{C_1 C_2 C_3 R_1 R_2 R_3}} \quad (12)$$

$$G(s) = \frac{7.836 * 10^{14}}{s^3 + 183816 * s^2 + 16825439512 * s + 7.836 * 10^{14}} \quad (12.1)$$

Por se tratar de um filtro de 3ª ordem, há uma queda de 60dB por década após a frequência de corte. A Figura 24 mostra a topologia do circuito bem como os valores dos componentes discretos utilizados. O amplificador operacional utilizado foi o NE5532, amplificador específico para aplicações que envolvem áudio pelo seu alto slew rate e baixa distorção.

Figura 24. Circuito Filtro Sallen Key Passa Baixa



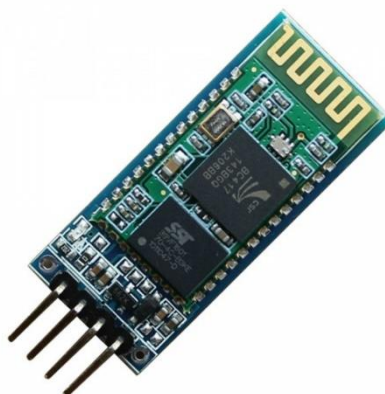
Fonte: Próprio autor

3.2.6 Módulo Bluetooth

Com o avanço e a popularização da tecnologia automotiva embarcada, atualmente é cada vez mais comum a interação do condutor com seu veículo através das centrais multimídias. Por isso, neste projeto foi implementado como interface para o usuário um aplicativo baseado em android, plataforma altamente empregada neste tipo de aplicação.

Para a comunicação do dispositivo android com o microcontrolador foi utilizado o módulo bluetooth HC-06 (Figura 25). Esse módulo se comunica através do protocolo UART, sua tensão de alimentação pode variar de 3,6V até 6V.

Figura 25. Módulo Bluetooth HC-06



Fonte: Disponível em <<http://buildbot.com.br/blog/configuracao-do-modulo-bluetooth-hc-06-com-arduino/>>

3.2.7 Alto-Falante

Embora o desenvolvimento do projeto se baseie somente em um protótipo para fins de demonstração sem a implementação prática do sistema em um veículo elétrico, é importante ressaltar como a escolha do conjunto de alto falantes, além da posição a serem situados no veículo, pode impactar no resultado final do som a ser escutado por pedestres nas ruas.

Como pode ser visto na seção 2.6, em geral, a percepção auditiva humana é melhor na banda intermediária das frequências audíveis, por isso para este tipo de aplicação, o ideal seria a elaboração de um projeto com alto falantes woofers e tweeters que possuem uma resposta melhor para essas frequências. No caso de woofers as propagações sonoras de baixa frequência são extremamente difusas, superior a 180° , o que necessitaria de boas caixas acústicas para o cancelamento das ondas de polaridade invertida, no entanto facilitaria o posicionamento externo no veículo devido a essa tendência menos direcional a um só sentido. Nas altas frequências, a responsabilidade cairia aos tweeters que são mais direcionais, sendo de suma importância serem posicionados em locais do veículo apontados para que seja mais fácil de pedestres ouvirem, pois, o comprimento de onda para essas frequências é menor, facilitando a absorção por objetos ao atingir o meio material ao qual se propaga.

3.3 AQUISIÇÃO E ANÁLISE DE ÁUDIO

Simular um som de motor de combustão interna baseando-se na condução do motorista é uma tarefa desafiadora devido à complexidade do som do motor e o intervalo de velocidades

possíveis. Dessa forma é necessário obter amostras de sons para a subsequente análise do comportamento dos sinais. Os sinais obtidos neste projeto foram retirados do site Freesound (freesound.org), site que disponibiliza um enorme banco de dados com trechos de áudio gravados por pessoas no mundo todo lançados sob licenças da Creative Commons permitindo a reutilização de forma não comercial e para pesquisa científica.

Os sinais de áudio abaixo analisados foram gravados por veículos parados em marcha neutra (ponto morto) desde uma rotação ociosa (800 a 1000 RPM) até aproximadamente 5000 RPM em faixas constantes.

3.3.1 Fontes sonoras de um motor

Considerando o som de um motor a combustão de 8 cilindros obtidos neste estudo, verifica-se que o mesmo é composto por várias fontes sonoras divididas em algumas categorias:

1. O barulho gerado pela combustão do combustível nos oito cilindros. A frequência desse som (frequência de pulso do motor) é proporcional a velocidade de rotação do motor e pode ser calculada através da equação (WU, 2016):

$$f_0 = (\text{números de cilindros}) * \frac{\text{RPM}}{120} \quad (13)$$

Onde f_0 é a frequência fundamental de pulso do motor. As intensidades dos impulsos em cada cilindro não são uniformes, dando origem a componentes harmônicos múltiplos de $1/8 * f_0$.

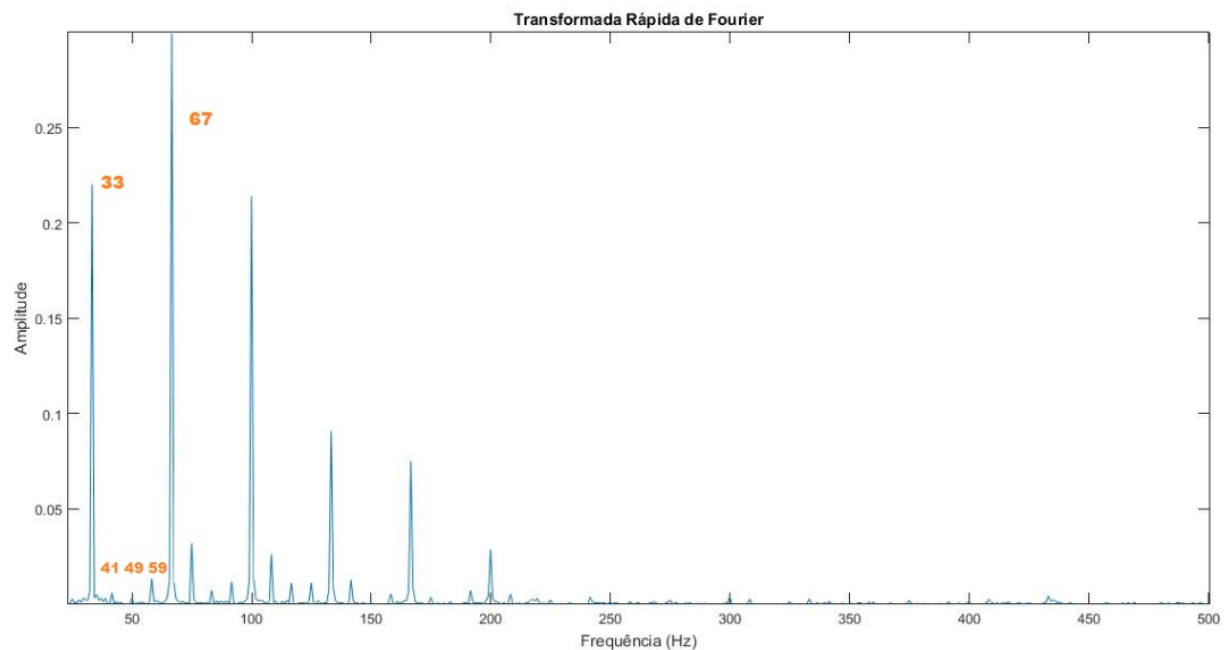
2. O ruído mecânico provocado pelo virabrequim e a estrutura sólida do motor durante o movimento dos pistões. Para um motor de quatro tempos, o combustível inflama uma vez a cada duas rotações do virabrequim para cada cilindro. Assim, para um motor de oito cilindros, a frequência de revolução do virabrequim é $1/4 * f_0$.
3. Ruído aerodinâmico causado pelo sistema de resfriamento do motor e ventiladores do alternador. Esse tipo de ruído está fortemente correlacionado com a combustão porque as fontes de som se originam pelo movimento do virabrequim. A frequência do componente depende da relação da polia, portanto, não é necessariamente um múltiplo de f_0 .

3.3.2 Análise Espectral

Para entender melhor o som do motor a combustão é interessante observar as características do sinal além do domínio do tempo, por isso é recorrido a ferramenta da FFT para decompor o sinal em amplitudes a diferentes frequências. De maneira geral, esses sinais são de baixas frequências com amplitudes mais significativas até 500 Hz, portanto a análise dará ênfase a essa faixa de frequência. Abaixo, nas

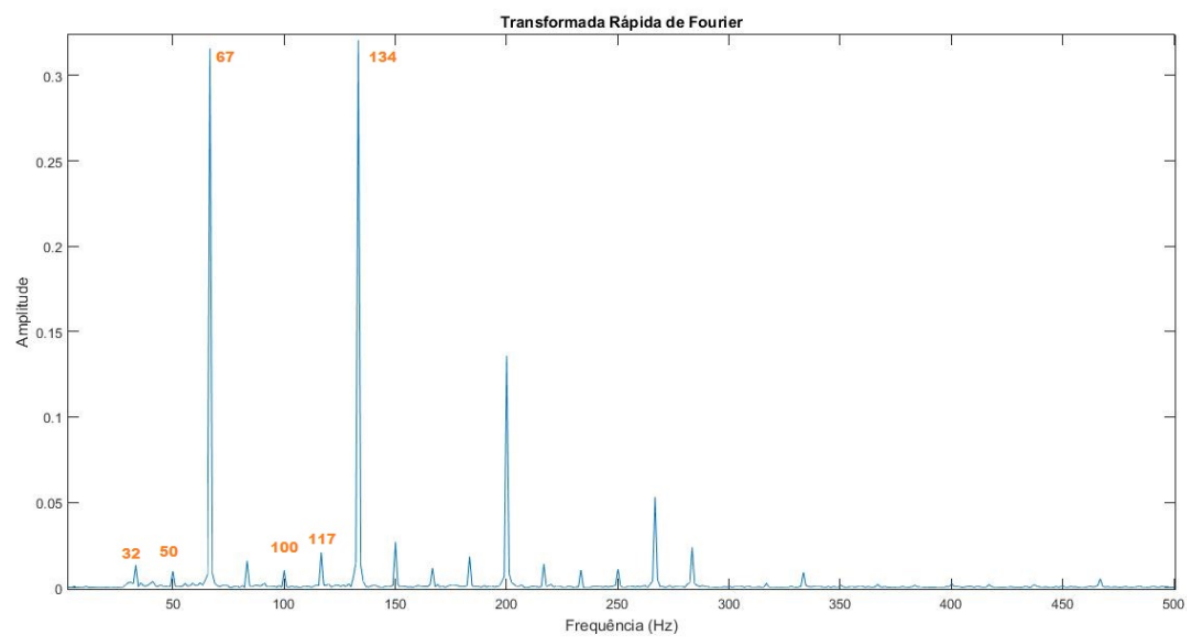
Figura 26, Figura 27, Figura 28, Figura 29 estão mostrados os espectros de frequências dos sinais citados e algumas características a serem observadas.

Figura 26. FFT som de motor aproximadamente 1000 RPM



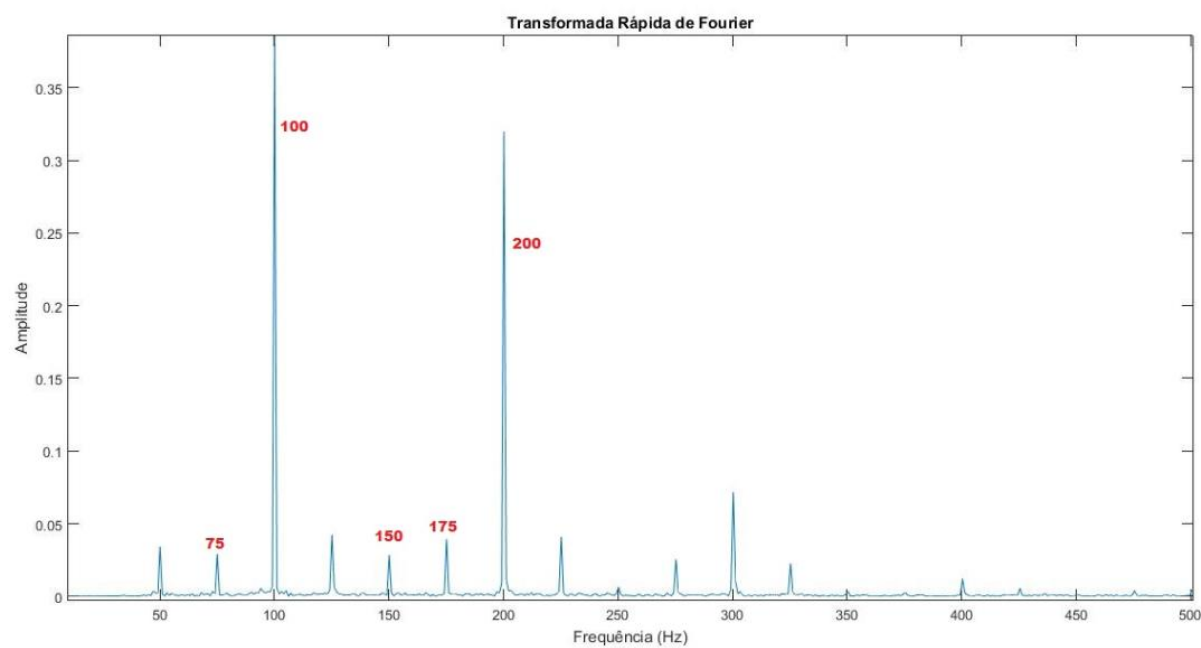
Fonte: Próprio autor

Figura 27. FFT som de motor aproximadamente 2000 RPM



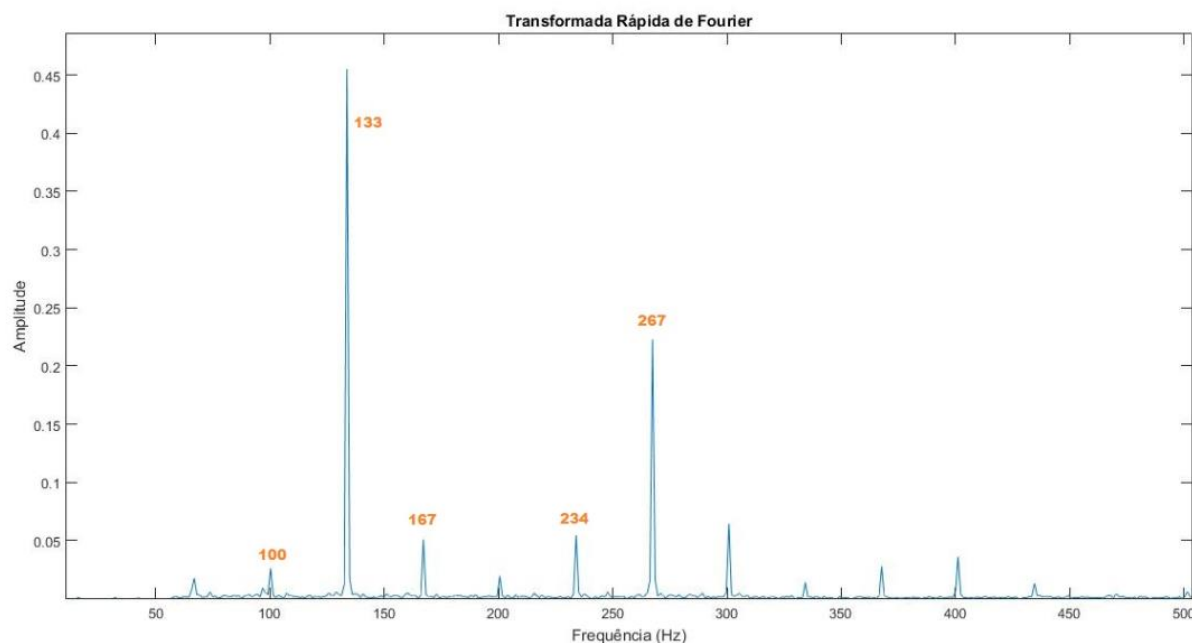
Fonte: Próprio autor

Figura 28. FFT som de motor aproximadamente 3000 RPM



Fonte: Próprio autor

Figura 29. FFT som de motor aproximadamente 4000 RPM



Fonte: Próprio autor

De acordo com os espectros, é possível notar as frequências f_0 (Equação 13) representadas nos picos de maior amplitude. São elas:

Figura 26: 67Hz; Figura 27: 134Hz; Figura 28: 200Hz; Figura 29: 267Hz. Além disso, estão evidenciadas algumas das frequências múltiplas de $1/8 * f_0$ e $1/4 * f_0$. Estas marcações juntamente com a fundamental correspondem a rotação do virabrequim e a combustão nos cilindros como foi descrito acima.

Outro ponto que pode ser verificado são as frequências que apresentam os valores de aproximadamente 3, 4 e 5 vezes $1/8 * f_0$. Estas frequências são as componentes harmônicas que se originam do processo da combustão.

As demais componentes significativas não destacadas são harmônicas proporcionais a velocidade do motor, onde a amplitude do som também é influenciada ao incremento da velocidade, especialmente em frequências superiores a 300 Hz. À medida que a velocidade do motor aumenta, a rotação e a vibração da estrutura mecânica aumenta significativamente. No entanto, o aumento da amplitude associada à combustão em frequências mais baixas não é significativo.

3.4 FIRMWARE

O fluxograma do firmware do microcontrolador para este projeto é mostrado na Figura 30. Os blocos serão abordados na sequência. O compilador utilizado foi o IAR devido a prática do autor com o mesmo.

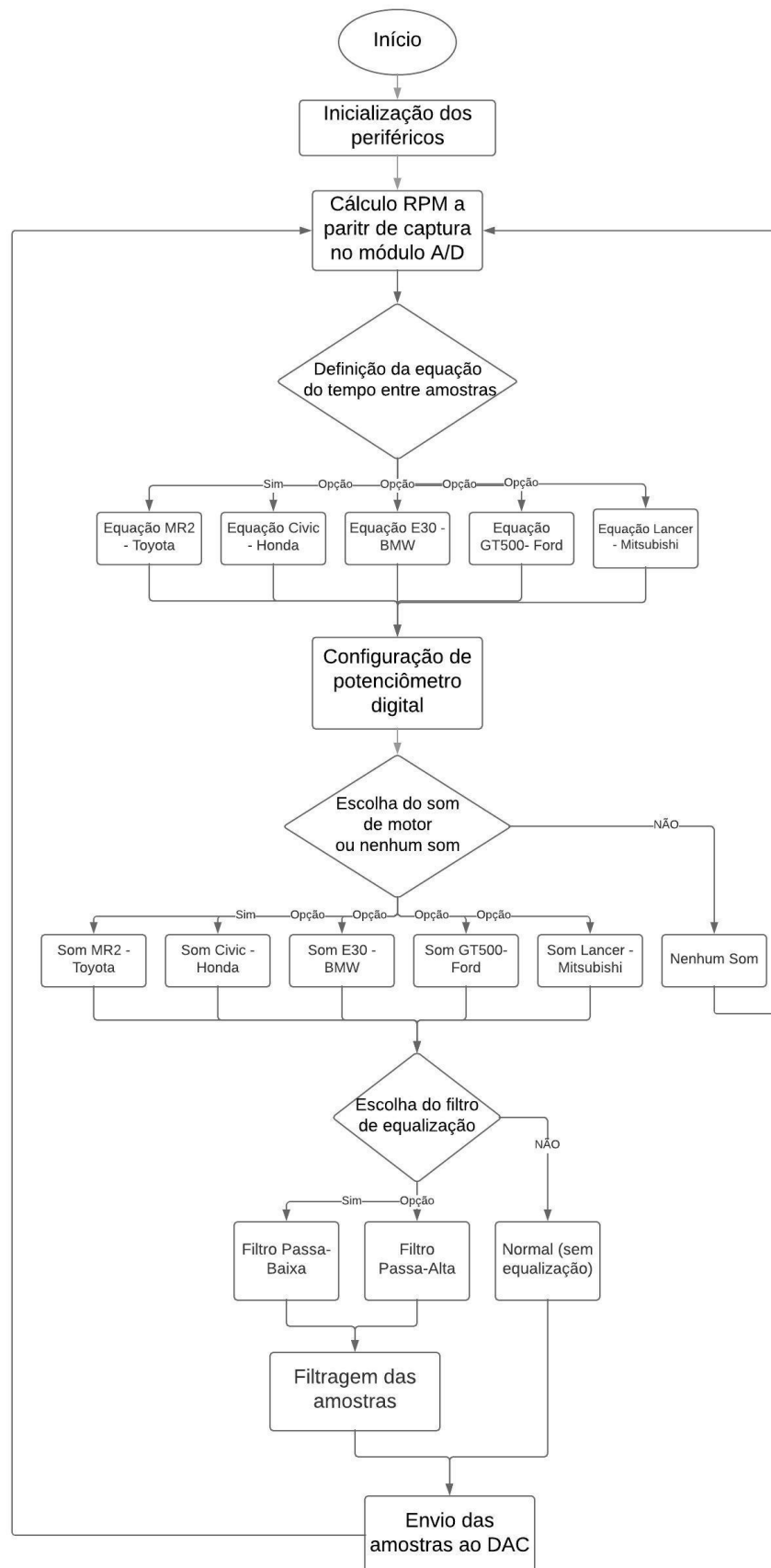
Todo o sistema funciona em um loop de fácil entendimento. Com o circuito devidamente montado e inicializado com clock de 80MHz, o módulo A/D verifica a cada 1ms o nível de tensão mandado pelo pedal acelerador eletrônico através de uma função de tratamento de interrupção (mostrada no Apêndice C). Com este dado, o programa estipula uma rotação genérica de maneira linear iniciando em 1000 RPM (carro ocioso) até 6000 RPM. Ainda, é calculado também de maneira linear a resistência que o potenciômetro digital deve apresentar para posteriormente variar a amplitude do sinal. A informação de resistência é enviada em protocolo SPI com dados de 8 bits podendo alterar de 0Ω até $5k\Omega$.

Uma variável pré-inicializada indica qual som previamente gravado deve ser reproduzido, como os sons tem características diferentes, cada um possui uma equação de reta diferente que fornece ao programa a variação do tempo entre amostras em microssegundos. As equações utilizadas são mostradas no código no Apêndice D. Como os sinais tem frequência de amostragem de 36kHz, o tempo entre amostras fica contornando valores próximos a $27\mu s$ ($1/36000$).

Após a função de interrupção possuir todos os parâmetros acertados, a função principal é responsável por apontar o tipo de equalização, calcular as amostras se necessitarem ser filtradas e enviá-las ao DAC.

Para permitir a troca de som ou equalização, foi desenvolvido uma interface com o usuário por meio de um aplicativo android que pode ser executado em smartphones, tablets e produtos similares. A interação entre o aplicativo e o microcontrolador é dada por comunicação bluetooth.

Figura 30. Fluxograma do firmware do microcontrolador

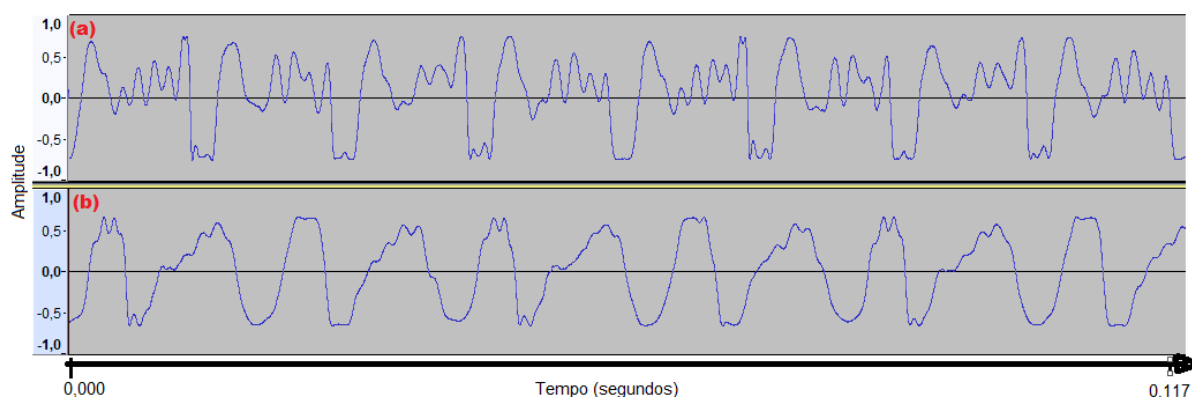


Fonte: Próprio autor

3.4.1 Processamento das amostras

Ao analisar os áudios de motores, é percebido que, por mais complexo que possa ser, o sinal apresenta uma periodicidade, afinal, a rotação de um motor é uma repetição contínua do movimento dos pistões. Abaixo na Figura 31, é possível observar a periodicidade de um sinal de um motor de 8 cilindros (E30_BMW) em rotação constante.

Figura 31. Sinal de áudio de motor com rotações a (a) - 3000 RPM e (b) - 1000 RPM



Fonte: Próprio autor

Os trechos em questão derivam do mesmo motor e embora apresentem diferenças em seu timbre, é um tanto perceptível que o sinal é “comprimido” conforme a rotação aumenta, isto é, a frequência aumenta.

O objetivo proposto neste projeto é a variação do som de uma forma próxima a realidade de acordo com a pressão exercida no pedal de aceleração provocada pelo usuário. Uma solução encontrada, levando em conta o hardware usado mais limitado para esse tipo de aplicação, é a alteração da frequência de amostragem baseado no processo de sobre amostragem (upsampling) e decimação (downsampling).

Primeiramente é recortado um ou mais períodos completos do trecho de áudio, o recorte foi realizado pelo software Audacity e precisou ser feito com precisão nas passagens por zero, pois a intenção final é a reprodução em loop, então um recorte errado ocasiona em uma reprodução desacertada com interrupção antes do fim, além disso, o tamanho do arquivo não pode ser muito grande para não abranger toda a memória flash do microprocessador utilizado, no caso, do ARM-M4 TM4C123 que possui somente 256KB. Esse intervalo do sinal então é armazenado no microprocessador na forma de um vetor de N amostras.

No processo de amostrar os sinais no microcontrolador, devem ser feitos ajustes de amplitude nas amostras. Como o DAC utilizado no projeto possui 16 bits, convém trabalhar com os valores das amostras indo de 0 a 65535, assim evita-se o uso de números negativos trazendo o ponto zero dos sinais a 32768. Esses processos de ajuste juntamente com a leitura do arquivo digital foram feitos com o software Matlab.

A reprodução desse intervalo de áudio sem passagem por nenhum filtro digital é dada pela função confeccionada em linguagem c:

```
void play_som_1793rpm(void)
{
    for(i = 0; i < 1319; i++)
    {
        Send_To_DAC8411(som_1793rpm[i], tempo);
    }
}
```

O laço *for* faz a varredura por todo o vetor que, nesse caso, possui 1319 amostras. Cada amostra é enviada ao DAC por intermédio da função *Send_To_DAC8411* que será explicada posteriormente. A frequência de amostragem é determinada pela variável '*tempo*'. Essa variável que acabará provocando a variação da frequência do sinal e, dessa forma, alterando o som. Seu valor é obtido na função de interrupção do A/D, que é responsável por coletar o nível de tensão do pedal acelerador. Para o caso da frequência de amostragem de 36kHz, o valor de *tempo* pode variar de 18 a 42, sendo o padrão 27us (1/36000). Fora dessa faixa o som já fica descaracterizado sendo ou muito lento para o caso de um tempo muito alto ou muito rápido e agudo para um tempo muito baixo constatado audivelmente.

3.4.2 Equalização

Neste projeto foi optado por permitir ao usuário a escolha de um tipo de equalização do som. Essa equalização é realizada por filtros FIR passa-baixas e passa-altas. Os coeficientes do filtro ficam pré-gravados no microcontrolador para então poderem ser aplicados a qualquer sinal em tempo real.

3.4.2.1 Obtenção dos coeficientes

Mesmo precisando de maior capacidade computacional devido a necessidade de muitos coeficientes para uma boa resposta, o filtro FIR é de fácil implementação. No caso deste projeto o hardware empregado não é o mais indicado para esta aplicação de filtragem se comparado a DSP's, no entanto a equalização proposta é simples e não é o maior foco do trabalho.

Os coeficientes foram obtidos no ambiente Matlab por método de linhas de comando, pois essa ferramenta provê meios simples e práticos para esse tipo de aplicação. O comando utilizado para obter os coeficientes está representado abaixo:

```
>> a = fir1(n,Wn,'ftype')
```

A função *fir1* retorna os coeficientes de um filtro FIR de ordem '*n*' usando a janela de Hamming. O parâmetro *Wn* indica a frequência de corte que deve ser normalizada pela metade da frequência de amostragem $F_s/2$. Para o projeto, os áudios utilizados possuem frequência de amostragem de 36kHz e espectro de 80 a 15kHz, assim, a frequência de corte foi estipulada em 50Hz para passa baixas e 1000Hz para passa altas, portanto:

$$Wn \text{ (Passa Baixa)} = \frac{50\text{Hz}}{\frac{36000}{2}} = 0,002777 \quad (14)$$

$$Wn \text{ (Passa Alta)} = \frac{1000\text{Hz}}{\frac{36000}{2}} = 0,05555 \quad (15)$$

O parâmetro "*ftype*" especifica o tipo de filtro a ser desenvolvido podendo ser 'low' para passa-baixas e 'high' para passa altas. Os coeficientes simétricos obtidos estão evidenciados na Figura 32. Ao todo, foram obtidos 21 coeficientes para cada filtro, a escolha desse número de coeficientes se dá pelo limite de tempo possível que o microcontrolador leva para executar os cálculos de filtragem sem gerar atraso nas amostras de áudio. O tempo de cálculo e o processo de filtragem será abordado no tópico seguinte.

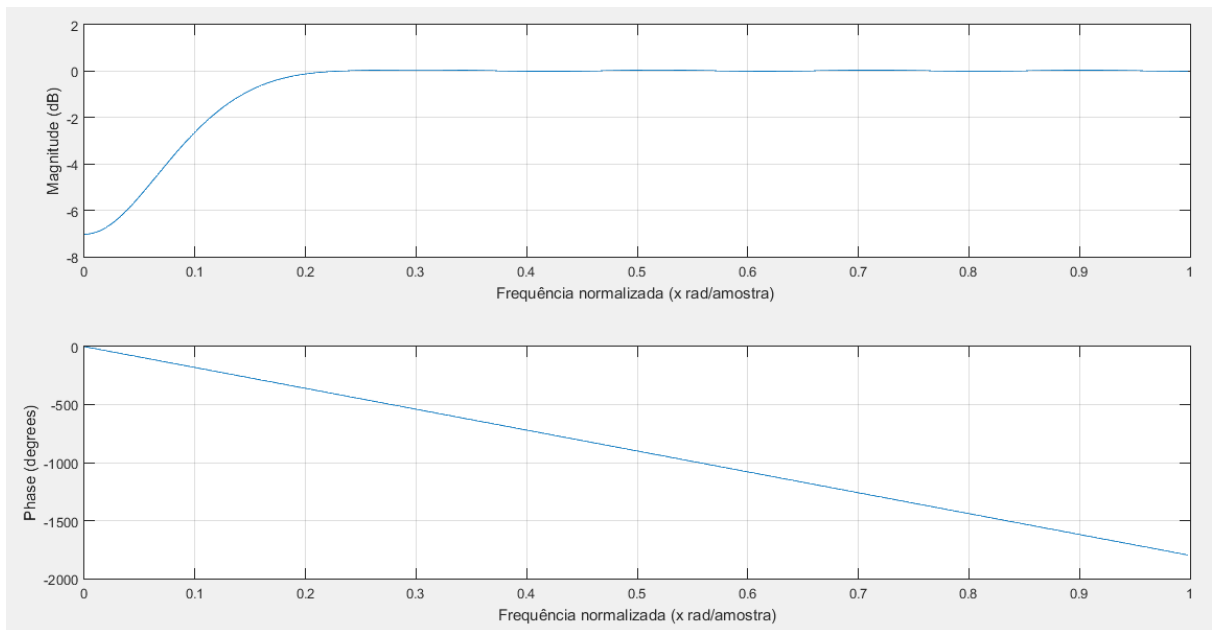
Figura 32. Coeficientes obtidos do filtro FIR

Coeficientes FIR - Passa-baixo				Coeficientes FIR - Passa-alto			
$h(0)$	0.0074	$h(11)$	0.0898	$h(0)$	- 0.0025	$h(11)$	- 0.0541
$h(1)$	0.0094	$h(12)$	0.0838	$h(1)$	- 0.0036	$h(12)$	- 0.0497
$h(2)$	0.0154	$h(13)$	0.0745	$h(2)$	- 0.0066	$h(13)$	- 0.0431
$h(3)$	0.0248	$h(14)$	0.0627	$h(3)$	- 0.0115	$h(14)$	- 0.0349
$h(4)$	0.0366	$h(15)$	0.0496	$h(4)$	- 0.0183	$h(15)$	- 0.0264
$h(5)$	0.0496	$h(16)$	0.0366	$h(5)$	- 0.0264	$h(16)$	- 0.0183
$h(6)$	0.0627	$h(17)$	0.0248	$h(6)$	- 0.0349	$h(17)$	- 0.0115
$h(7)$	0.0745	$h(18)$	0.0154	$h(7)$	- 0.0431	$h(18)$	- 0.0066
$h(8)$	0.0838	$h(19)$	0.0094	$h(8)$	- 0.0497	$h(19)$	- 0.0036
$h(9)$	0.0898	$h(20)$	0.0074	$h(9)$	- 0.0541	$h(20)$	- 0.0025
$h(10)$	0.0919			$h(10)$	0.9467		

Fonte: Próprio autor

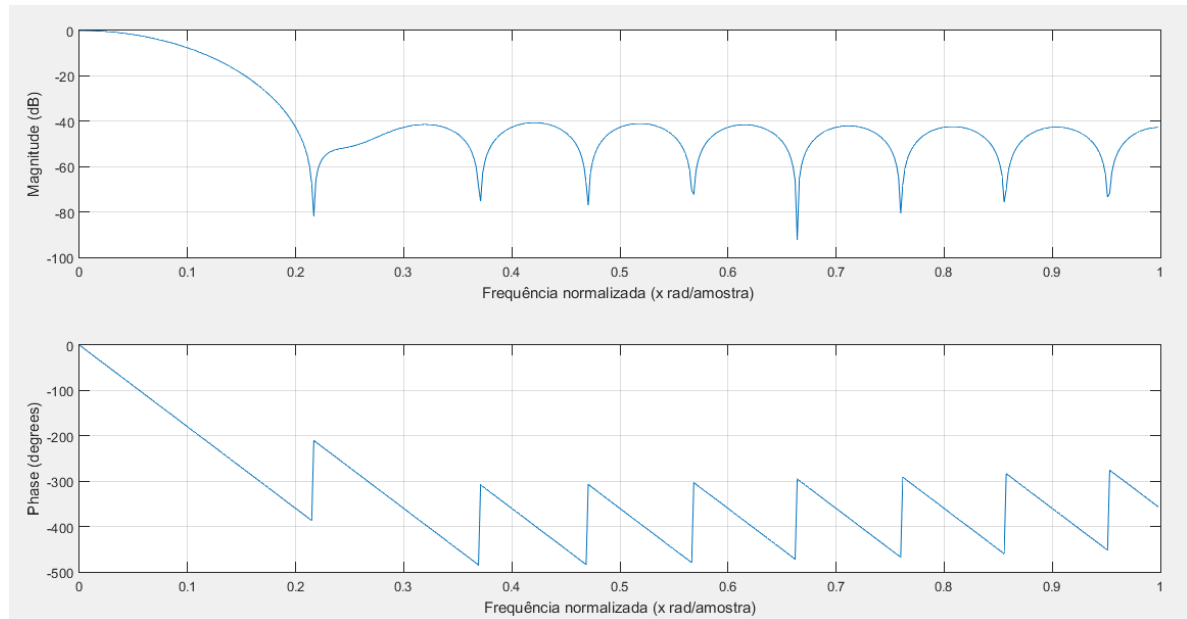
O resultado teórico e as características do filtro são mostrados na Figura 33 para o filtro passa alta e Figura 34 para o filtro passa baixa.

Figura 33. Magnitude e Fase FIR Passa Altas



Fonte: Próprio autor

Figura 34. Magnitude e Fase FIR Passa Baixas



Fonte: Próprio autor

Pode ser observado em ambas as respostas que a fase é linear na banda de passagem, o que é uma característica do filtro FIR. As respostas mostram que a frequência de corte de ambos os filtros foi um tanto diferente das calculadas, isso ocorre, pois, para o filtro ser ideal, a quantidade de coeficientes deve ser infinita, o que é uma coisa impossível de se conseguir. Mas com 21 coeficientes a resposta se tornou aceitável para a prática, sendo possível ouvir um som mais grave ou mais agudo dependendo do filtro utilizado na equalização.

3.4.2.1 Filtragem

Com os coeficientes obtidos, o próximo passo é a realização da filtragem dos sinais utilizados no projeto. Para isso, o hardware executa o cálculo das amostras filtradas baseado na Equação 6 da seção 2.4.4.1. A filtragem conseguida em firmware se deu com os 21 coeficientes da Figura 32.

Para o funcionamento correto usando a Equação 6 em código C, foi necessário que n da sequência de amostras $x[n]$ iniciasse em 21 (número total de coeficientes), portanto, as primeiras 21 amostras do sinal são desprezadas, caso contrário, não existiria condições iniciais no cálculo. Esse desprezo de amostras não gera nenhum efeito perceptível na perda do sinal já que os vetores contêm em média mais de 2000 amostras. Outro fator importante considerado foi o tempo total que o microcontrolador levava para o processo de cálculo. Com 21

coeficientes, foi constatado em osciloscópio que o tempo de cálculo era aproximadamente 10us, por isso o tempo deve ser descontado do intervalo entre amostras para não gerar nenhum atraso na reprodução.

3.4.3 Comunicação com DAC8411

Como foi abordado na seção hardware, o DAC8411 possui interface SPI a 3 fios. O método de envio é mostrado na Figura 35. A função de escrita na SPI é acessível na biblioteca TivaWare, disponibilizada pelo próprio fabricante da placa de desenvolvimento ARM-M4. No entanto, a TivaWare só possui funções prontas para envio de dados via SPI de até 16 bits, e o registrador interno do DAC possui 24 bits, dessa forma foi necessário enviar o sinal em 3 pacotes com 8 bits conforme mostra o código em C abaixo.

```
void Send_To_DAC8411 (uint16_t data, unsigned char tempo_entre_amostras)
{
    GPIOPinWrite(GPIO_PORTA_BASE,GPIO_PIN_3,0); //Sync Low
    SSIDataPut(SSIO_BASE, (byte1_8411(data)));
    SSIDataPut(SSIO_BASE, (byte2_8411(data)));
    SSIDataPut(SSIO_BASE, (byte3_8411(data)));
    while(SSIBusy(SSIO_BASE)); //Espera buffer SSI esvaziar
    GPIOPinWrite(GPIO_PORTA_BASE, GPIO_PIN_3, GPIO_PIN_3); //Sync High
    Wait(tempo_entre_amostras);
}
```

As funções *byte1_8411*, *byte2_8411* e *byte3_8411* possuem como argumento de entrada a informação original de 16 bits para então manipulá-los de forma a ficar de acordo com a ordem da tabela da Figura 35, considerando os dois primeiros bits PD1 e PD0 como bits de controle e os últimos 6 bits como *don't care*. As respectivas funções das manipulações binárias são mostradas abaixo:

```
unsigned char byte1_8411 (uint16_t data)
{
    unsigned char byte1 = ((data >> 10) & 255);
    return byte1;
}
```

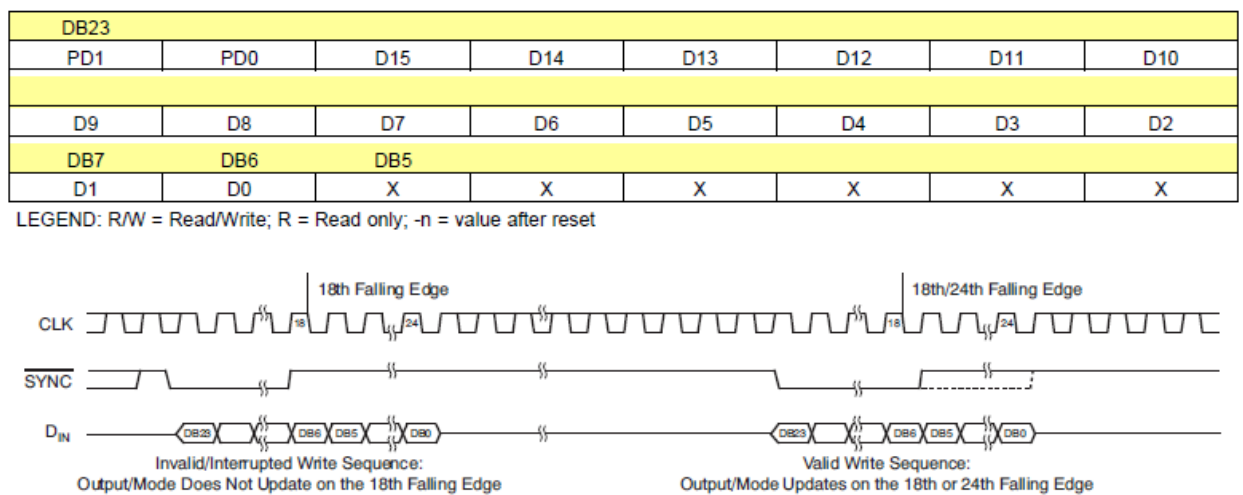
```

unsigned char byte2_8411 (uint16_t data)
{
    unsigned char byte2 = ((data >> 2) & 255);
    return byte2;
}

unsigned char byte3_8411 (uint16_t data)
{
    unsigned char byte3 = ((data << 6) & 255);
    return byte3;
}

```

Figura 35. Esquema de comunicação síncrona do DAC8411



Fonte: Datasheet Texas Instruments, 2015

3.4.4 Timer – Intervalo entre amostras

O temporizador é uma ferramenta imprescindível para o funcionamento do projeto, pois através dele é possível definir o intervalo entre amostras e fazer a variação da frequência do sinal. O timer utilizado no ARM foi o SysTick, que é um mecanismo interno do controle de interrupção microprocessador.

A função *SysTickbegin()* mostrada abaixo inicia o timer e define o período como 80. Esse período significa que ele contará 80 variações na borda do clock que é 80Mhz ou 12,5ns (1/80M), sendo assim o tempo resultante será:

$$tempo = 80 * 12,5ns \quad (16)$$

$$tempo = 1us \quad (16.1)$$

```
void Init_SysTickbegin()
{
    SysTickPeriodSet(80);
    SysTickIntRegister(SysTickInt);
    SysTickIntEnable();
    SysTickEnable();
}
```

Cada vez que é contado 1us, o acréscimo é alocado na variável *millis* através de *SysTickInt*:

```
void SysTickInt()
{
    millis++;
}
```

Por fim, a função *Wait()* permite como parâmetro, escolher um tempo dado em microssegundos dando uma flexibilidade e facilidade as necessidades do programador.

```
void Wait(uint32_t time)
{
    uint32_t temp = millis;
    while( (millis-temp) < time){
    }
```

3.5 APLICATIVO ANDROID

Como alternativa a interface de comunicação do sistema com o usuário foi decidido confeccionar um aplicativo baseado em Android. A escolha de fazer um aplicativo deve-se a notável evolução da interação que os carros possuem com o condutor atualmente através de centrais multimídias e computadores de bordo, dispositivos os quais na maioria embarcam o sistema operacional Android.

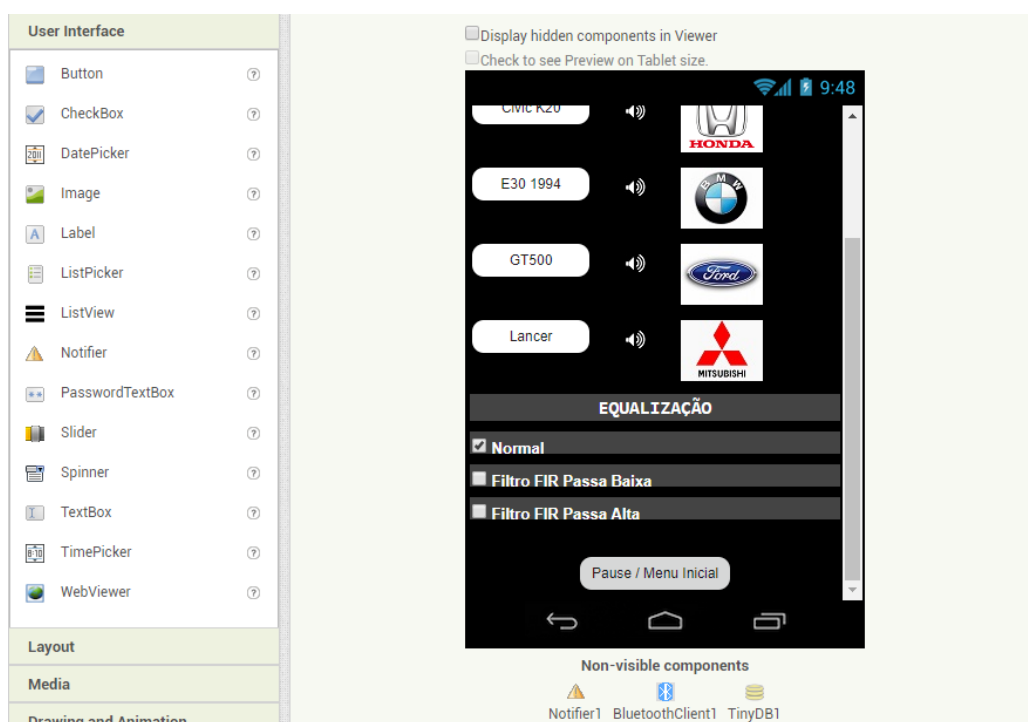
Para a realização do aplicativo, foi usado o App Inventor, uma plataforma resultante da parceria entre a empresa Google e a universidade MIT. Esta ferramenta disponibiliza de forma gratuita ao usuário um ambiente de programação visual em blocos intuitivo que permite qualquer pessoa construir aplicativos para smartphones e tablets.

O sistema de desenvolvimento é composto por duas áreas de trabalho, a primeira é o *Designer*, onde o criador ajusta toda a parte visual do aplicativo por meio da colocação de imagens, botões e textos. A segunda é o *Blocks*, na qual é associada toda a parte de lógica e controle nas ações do aplicativo através da combinação de blocos.

3.5.1 Design

O layout do aplicativo tem o objetivo de ser simples e intuitivo ao usuário. O ambiente de desenvolvimento pode ser verificado na Figura 36. A tela principal conta com botões onde será possível fazer a escolha dos sons desejados, todos identificados com os respectivos carros e marcas dos quais os sinais de áudio foram oriundos. Também há uma parte composta por caixas de seleção onde é possível optar pela filtragem do sinal na aba equalização. Por fim, a reprodução pode ser interrompida a qualquer momento pelo botão “Pause/Menu Inicial”. Na parte “Non-visible Components” estão introduzidas as funcionalidades que rodam em segundo plano no aplicativo, nesse caso “BluetoothClient1” é responsável por associar o bluetooth do dispositivo com o aplicativo, “TinyDB1” para manter o bluetooth ligado mesmo com mudança de tela e “Notifier1” para exibir mensagens no display caso algum erro aconteça como falha na conexão bluetooth.

Figura 36. Parte de Design do aplicativo

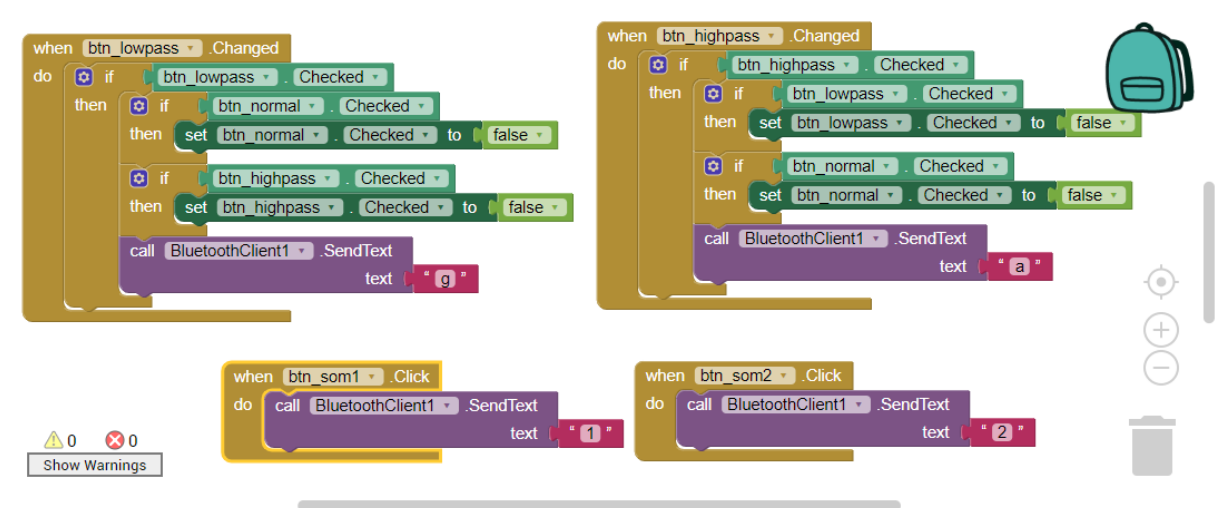


Fonte: Próprio autor

3.5.2 Editor de blocos

É pelo editor em blocos que se associa ações aos elementos presentes no aplicativo. Primeiro foi necessário gerar uma variável global possibilitando o funcionamento do bluetooth para em seguida fazer toda a lógica de conexão e de notificação caso houvesse alguma falha. Na Figura 37 está mostrado uma parte da programação em blocos dos botões dos filtros digitais e de alguns sons. Para o sistema reconhecer qual botão ou caixa foi selecionado, é enviado um caractere pelo aplicativo que será recebido via UART e interpretado no programa do microcontrolador. O componente intermediário que torna esse envio de caracteres possível é o módulo bluetooth HC-06 que recebe a informação sem fio do dispositivo android e repassa ao ARM.

Figura 37. Programação em blocos App Inventor

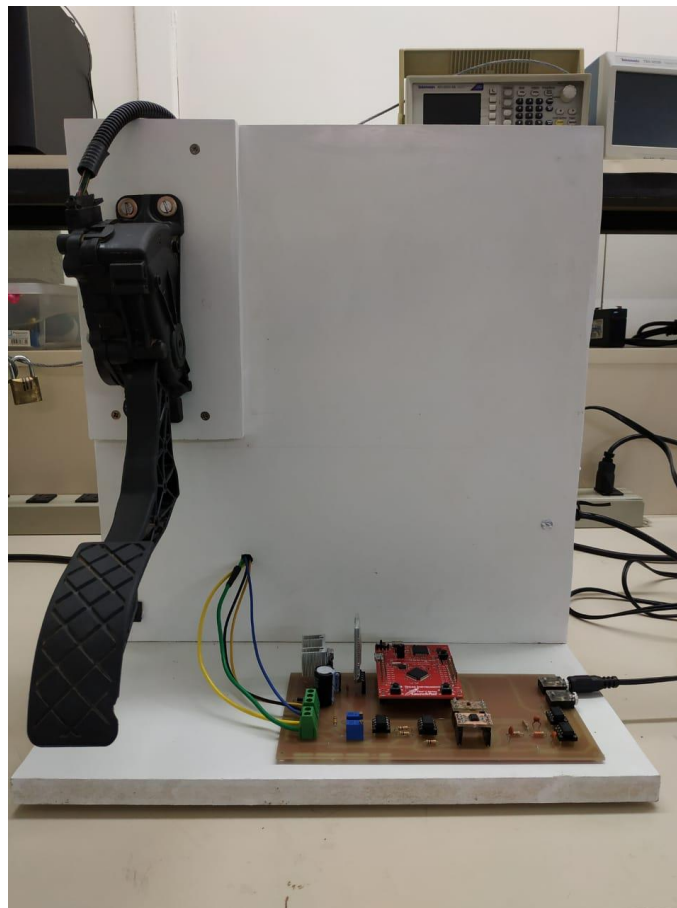


Fonte: Próprio autor

4. RESULTADOS

O protótipo final do projeto é mostrado na Figura 38. A estrutura foi montada em madeira MDF facilitando a fixação do pedal de aceleração na parte superior. O pedal eletrônico está com sua alimentação ligado em uma fonte ATX, a qual também alimenta com 12V a placa de circuito impresso. Para fins de demonstração, o sinal de áudio gerado foi devidamente acoplado com buffers e reproduzido por um conjunto composto de um subwoofer para as baixas frequência e um alto falante com capacidade de reprodução para medias e altas frequências até aproximadamente 20kHz.

Figura 38. Protótipo do projeto

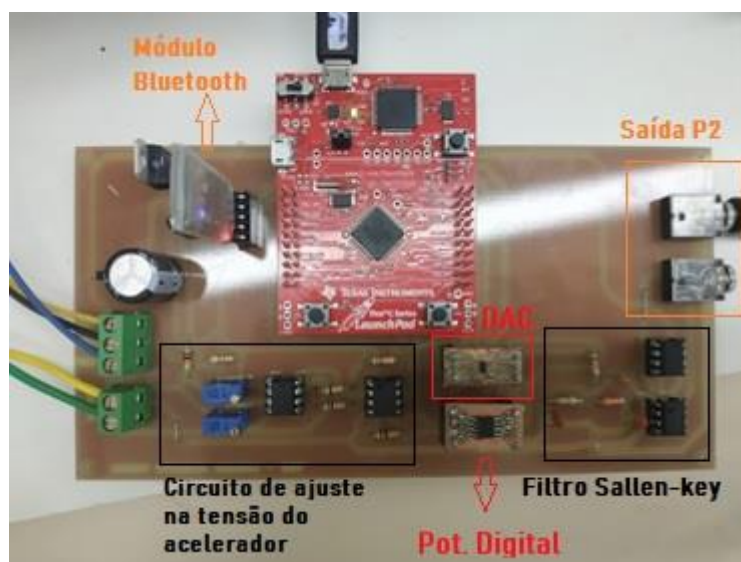


Fonte: Próprio autor

Na placa confeccionada da Figura 39 está contido todo o hardware englobando o filtro analógico e o circuito do acelerador eletrônico. O ARM, o potenciômetro digital, o módulo bluetooth e o DAC são alimentados pelo regulador LM7805 que fornece os 5V. A saída do circuito foi composta por duas portas P2 fêmeas. Em uma delas pode ser usado um cabo estéreo

para dois alto-falantes, a outra possui suporte para cabo mono ou até um estéreo, mas com o aproveitamento de somente um canal.

Figura 39. Placa confeccionada para o protótipo



Fonte: Próprio autor

Para a reprodução em ambientes internos o subwoofer (Figura 40) mostrou um grande diferencial na massificação do som. Isso propiciou uma sensação de vibração que deu mais realidade a ideia do projeto.

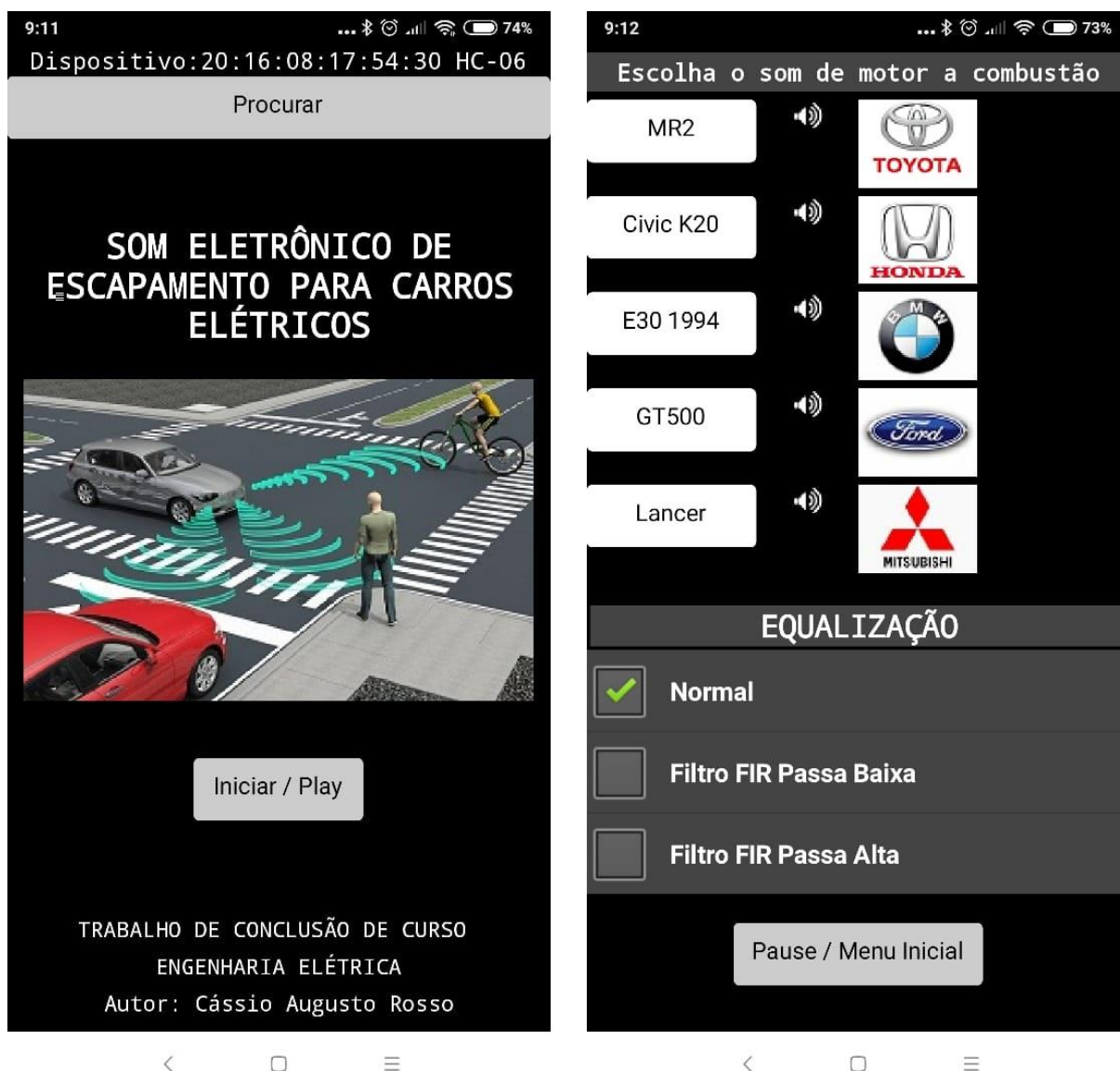
Figura 40. Conjunto de alto-falantes para reprodução sonora



Fonte: Próprio autor

O layout final do aplicativo está mostrado na Figura 41. Ele é composto por uma tela inicial para realizar o pareamento com o módulo Bluetooth e outra tela por onde pode ser feito a trocas de sons dos motores e a aplicação ou não dos filtros digitais.

Figura 41. Aplicativo pronto



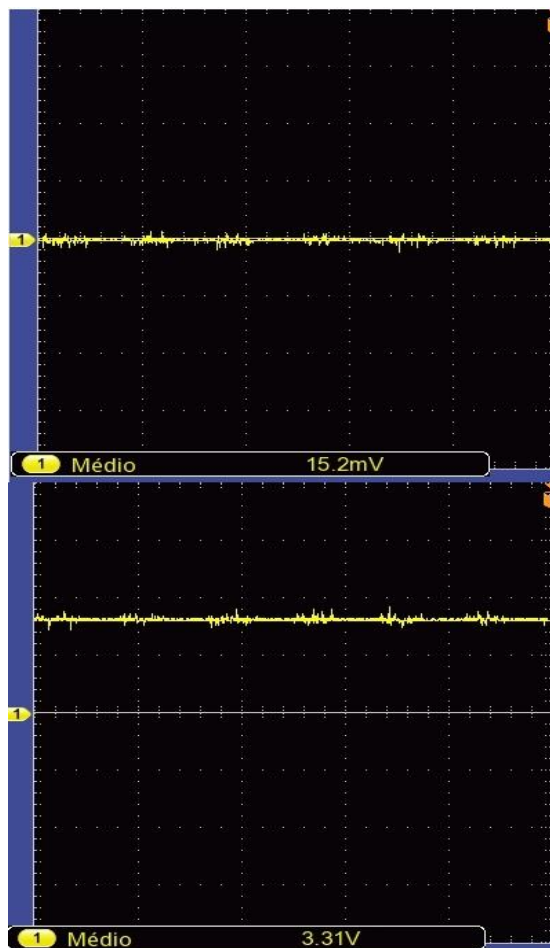
Fonte: Próprio autor

4.1 RESULTADO A/D

O circuito de ajuste da tensão na entrada do módulo A/D proveniente do acelerador eletrônico mostrou-se adequado a variação suportada pelo periférico de 0 a 3,3V, comprovando assim o funcionamento do amplificador subtrator em relação a tensão de 0,79V do pedal em

posição ociosa. As tensões de referência dos divisores resistivos possuem um ajuste fino através dos trimpots para facilitar a regulagem. O resultado em osciloscópio com a tensão máxima e mínima na saída do circuito pode ser visualizado na Figura 42

Figura 42. Variação de tensão no canal A/D



Fonte: Próprio autor

4.2 SINAIS GERADOS

O primeiro teste realizado foi em relação a qualidade dos sinais gerados pelo conjunto microcontrolador/DAC/filtro. Para isso, foi comparado a reprodução do mesmo sinal de áudio de motor feito por uma placa de som padrão de notebook e pelo sistema eletrônico desenvolvido. O áudio da análise é o arquivo digital da Figura 43 mostrado no software Audacity correspondente a gravação do motor E30 da BMW em baixa rotação.

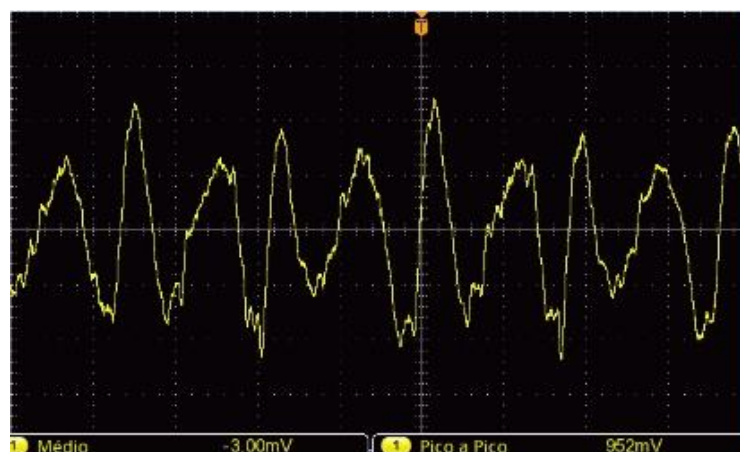
Figura 43. Sinal Motor E30 visto no software Audacity



Fonte: Próprio autor

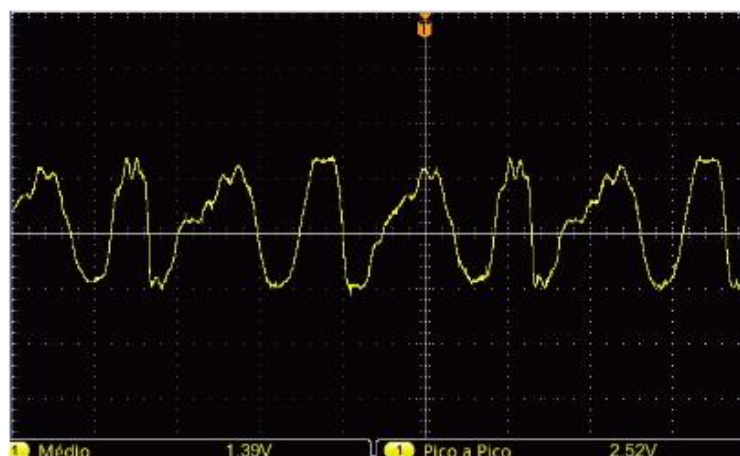
Esse sinal (Figura 43) então foi reproduzido pela placa de som Realtek ALC255, placa padrão de um notebook, e pelo protótipo desenvolvido para serem analisados por osciloscópio. Os resultados são verificados na Figura 44 e Figura 45.

Figura 44. Sinal motor E30 reproduzido por notebook (Realtek ALC255)



Fonte: Próprio autor

Figura 45. Sinal motor E30 reproduzido pelo protótipo

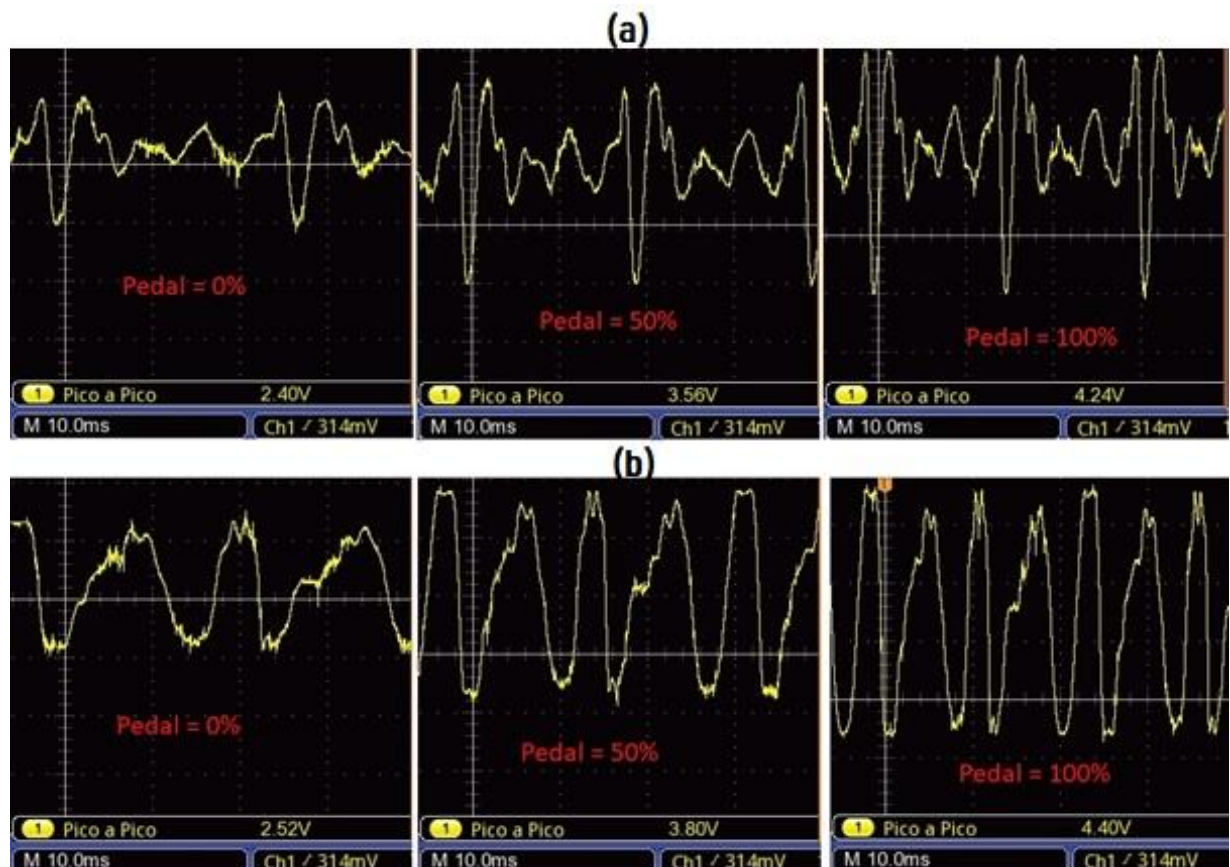


Fonte: Próprio autor

Como pode ser verificado, o protótipo obteve um resultado de conversão de maior confiabilidade que uma placa de som padrão de notebook, isso pode ser explicado devido a boa qualidade do amplificador operacional do filtro de reconstrução (NE5532) e do DAC (8411) utilizados se comparado ao padrão industrial que muitas vezes visa um baixo custo nesses tipos de componentes, combinado a eficiência do filtro de 3ª ordem com frequência de corte menor do que a normalmente utilizada de 20kHz, evitando ainda mais ruído. O processamento feito pelo microprocessador também teve um resultado positivo ao enviar as amostras no tempo programado

Na Figura 46 pode ser observado dois sinais gerados pelo microcontrolador correspondentes ao motor do carro MR2 da Toyota (a) e ao motor E30 da BMW (b). Eles estão mostrados em posições distintas do pedal de aceleração, onde 0% significa que o pedal não está apertado, 50% ele está na metade da posição de curso e 100% está totalmente pressionado. Assim nota-se que o timbre dos sinais permanece o mesmo, mas a frequência varia conforme o acelerador eletrônico é apertado, provocando a mudança do tempo entre amostras de áudio, dando a sonoridade de aceleração ou desaceleração do motor.

Figura 46. Sinais gerados

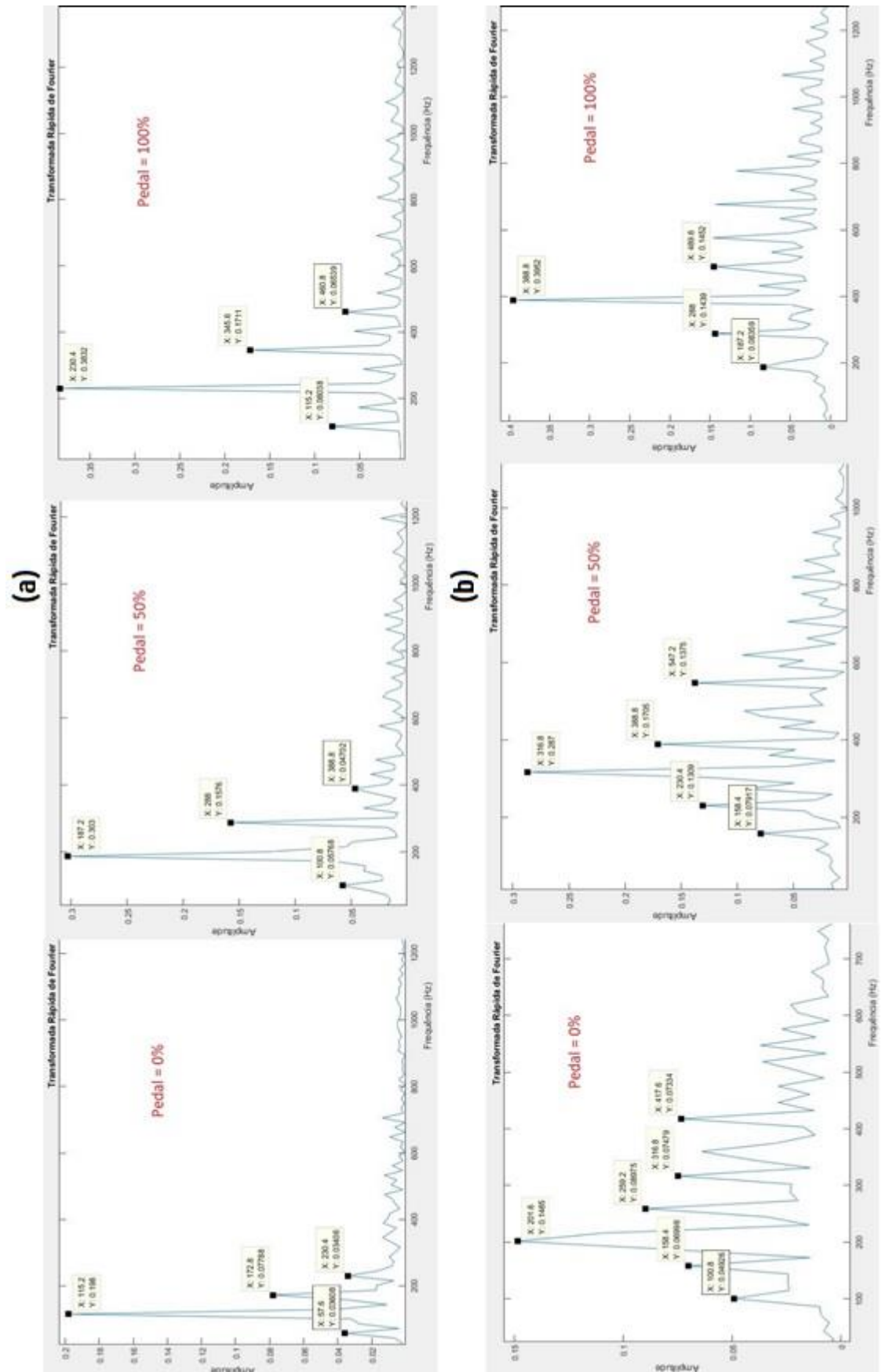


Fonte: Próprio autor

Outro fator a ser observado, é a variação da amplitude desses sinais. Ambos chegam a tensão de pico a pico na casa dos 4V (MR2 – 4,24V e E30 – 4,40V) simulando a rotação máxima e em rotação mínima ficam na casa dos 2V (MR2 – 2,40V e E30 – 2,52V), comprovando o funcionamento do potenciômetro digital na atenuação, dando o efeito de crescimento e diminuição gradual da intensidade do som.

Na Figura 47 estão retratadas as FFT's dos sinais mostrados na Figura 46 nas mesmas condições das posições do acelerador eletrônico em uma faixa de frequência de aproximadamente 1kHz. Como é de se esperar, a frequência fundamental destacada é deslocada a direita ao mesmo tempo que a amplitude é aumentada. De forma geral, o espectro de frequência prático possui uma similaridade com os sinais estudados na seção 3.3.2 em relação as fontes sonoras, apresentado em geral frequências que equivaleriam a rotações um pouco maiores que as da realidade, como por exemplo no espectro (a) com o pedal em 0%, onde a frequência fundamental é de 115Hz, significando aproximadamente 1725RPM (vide Equação 13). Obviamente que aqueles sinais dispõem de frequências mais bem definidas inclusive nas harmônicas pois representam segundos de reprodução, enquanto no projeto o recorte foi de milissegundos para reprodução em loop.

Figura 47. FFT's dos sinais em diferentes posições do pedal

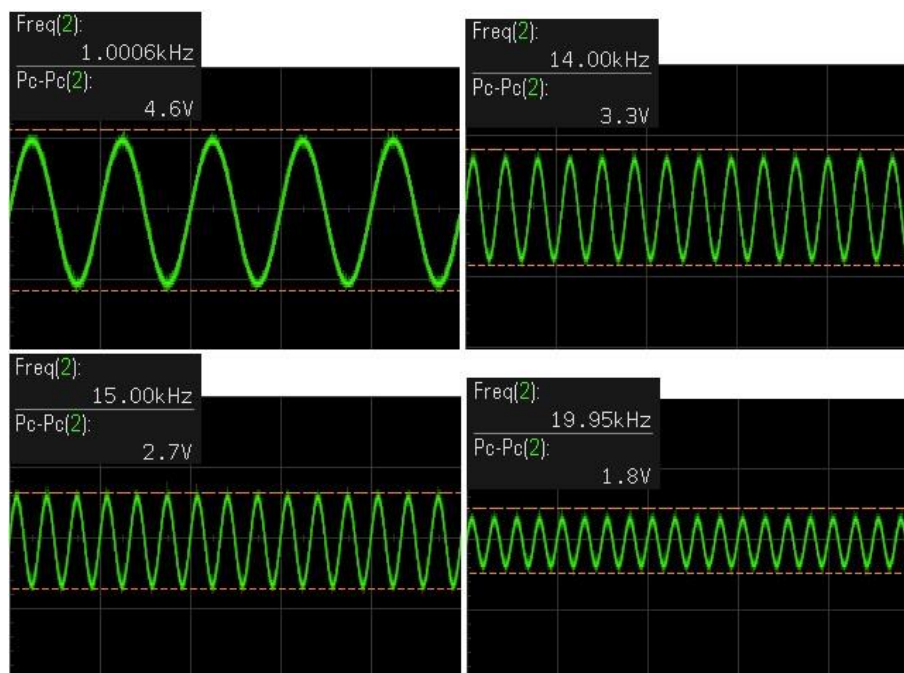


Fonte: Próprio autor

4.3 FILTRO SALLEN KEY

O teste do filtro sellen key passa-baixa foi realizado com o uso de um gerador de sinais. As etapas para observação do comportamento do filtro estão representadas na Figura 48 através da análise da atenuação de uma senoide em diferentes frequências. Na frequência de corte teórica de 15 kHz foi evidenciado uma queda de 4,68dB, isso significa que na prática a frequência de corte foi um pouco mais abaixo com -2,88dB em 14 kHz próximo a -3dB da banda de passagem. Isso pode ter ocorrido pela própria diferença nos valores dos componentes teóricos em comparação com os valores comerciais. Mas ele se mostrou eficiente na limitação de banda dos sinais utilizados prevenindo ruídos de maior frequência que pudessem surgir.

Figura 48. Teste Filtro Sallen Key



Fonte: Próprio autor

Partindo para o âmbito de reconstrução do sinal analógico, o uso do filtro apresentou uma suavidade no sentido de eliminar passos da conversão mais “quadrados” como pode ser verificado na Figura 49 , mas devido a própria qualidade do DAC8411 a diferença se apresentou pequena.

Figura 49. Sinal antes e após Filtro Sallen Key

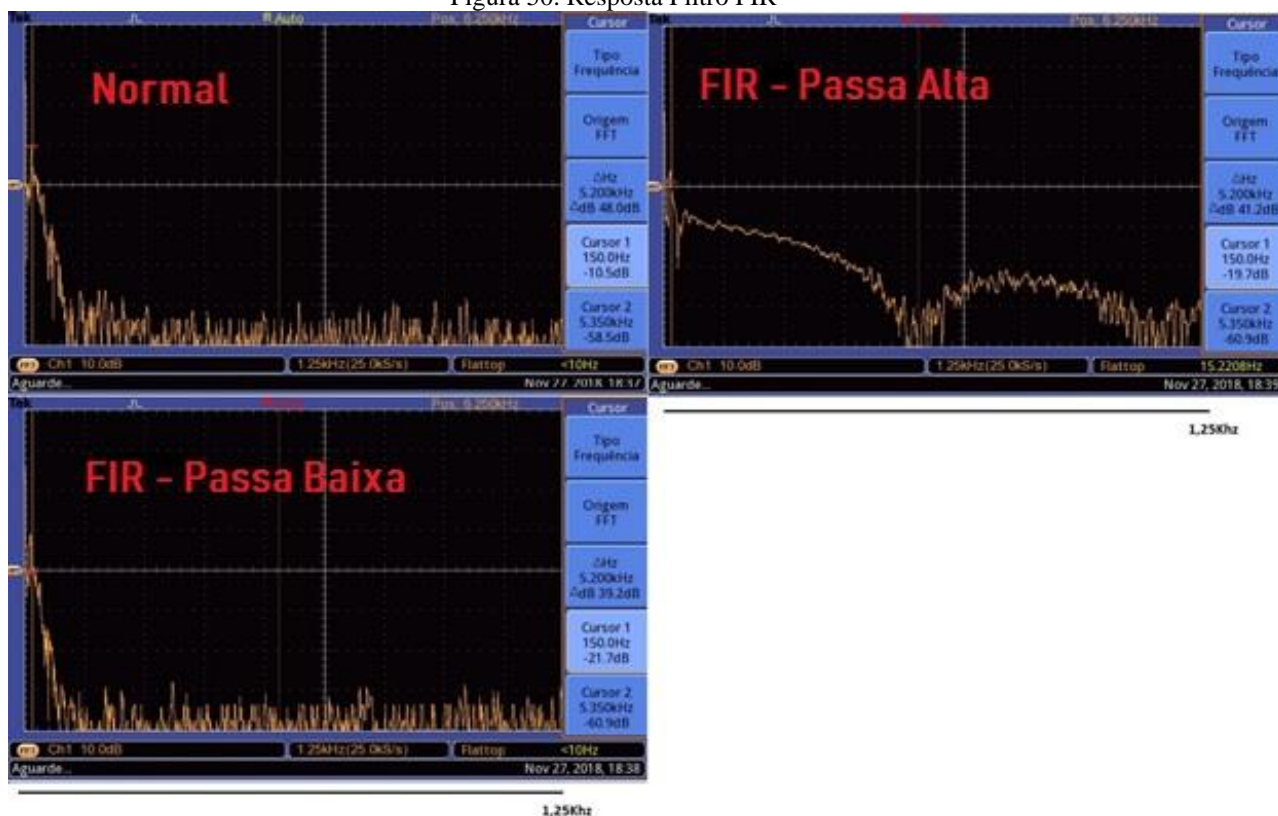


Fonte: Próprio autor

4.4 FILTRO FIR

A resposta do filtro digital FIR aplicado ao sinal de motor E30 está mostrado na Figura 50 em um recorte de 1,25kHz. A frequência central marcada nas três imagens de osciloscópio é de 150Hz. Para o retrato do sinal sem filtro, esta frequência está com uma amplitude de -10,5dB. No filtro passa-baixa, a mesma frequência apresentada está em -21,7dB, evidenciando a queda após a frequência de corte de 50Hz. No filtro passa alta a resposta no geral se mostrou mais eficiente, com uma amplitude de -19,7dB em 150Hz. A frequência de corte estipulada para o passa-alta foi de 1kHz, dessa forma, houve uma atenuação nas baixas frequências e o som tornou-se mais agudo.

Figura 50. Resposta Filtro FIR



Fonte: Próprio autor

O filtro passa-baixa apresentou uma queda de 11,2dB em 150Hz (100Hz acima da frequência de corte) e o filtro passa-alta atenuou 9,2dB nessa mesma frequência (850Hz abaixo da frequência de corte) evidenciando o funcionamento dos mesmos, porem com maior eficácia do filtro passa-baixa devido ao próprio espectro dos sinais utilizados que são de baixas frequências tornando mais significativa a atenuação. O uso limitado de coeficientes acabou provocando menor atenuação em algumas baixas frequências abaixo de 1000Hz desejadas no filtro passa-alta, já que esse maior poder de processamento (execução de cálculos com um número maior de coeficientes) não era disponível no ARM sem gerar atraso no envio das amostras de áudio. No quesito de som ouvido, a equalização se mostrou mais que suficiente, sendo possível perceber o realce nos graves e agudos conforme eram alternados os filtros.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o aumento do uso dos carros híbridos e elétricos principalmente em países mais desenvolvidos, a preocupação com a segurança dos pedestres em relação a ausência do som emitido despertou a necessidade de criação de sistemas que possam servir de alerta e prevenir acidentes. O desenvolvimento de tecnologias de geração de ruídos artificiais para esses veículos já é realidade por parte de muitas empresas e foi o que motivou a realização desse projeto.

O resultado do protótipo foi bem satisfatório no que se propôs a realizar e levando em conta a plataforma eletrônica utilizada para este tipo de aplicação envolvendo áudio. Foi necessário um bom tempo para a escolha da técnica de processamento que fizesse a variação do som para a simular um motor, já que não era encontrado bibliografia a respeito dos sistemas existentes incorporados por empresas automotivas no interior de veículos. A variação da frequência de amostragem com a manutenção do mesmo número de amostras foi eficiente na suavidade de aumento e diminuição da frequência do som, embora tenha certos limites como a não alteração no timbre do sinal e a faixa aproveitável de tempo entre amostras que pudesse ser utilizado. Assim, abrem-se novas possibilidades para projetos futuros com alternativas diversas, como métodos de interpolações de sinais distintos em diferentes rotações, aplicações de filtros em tempo real ou até sintetização matemática dos sinais, sugestões que demandariam um hardware mais potente.

A resposta do DAC e filtro de reconstrução utilizado foi extremamente positiva em relação a qualidade e confiabilidade de conversão se comparado a sistemas já prontos como uma placa de som padrão de notebook. O processo de comunicação e envio das amostras por protocolo SPI demandou um bom estudo e pesquisas para o completo entendimento, o que acabou agregando um excelente conhecimento de programação.

O projeto de filtro FIR também foi um desafio devido a limitação de hardware e o processo de filtragem no programa, já que o tempo de cálculo das amostras filtradas levava em torno de 10us, mas mostrou-se aceitável principalmente para o passa-baixa, que obteve uma atenuação acima de 10dB com 100Hz após a frequência de corte. No filtro passa-alta a resposta poderia ser melhor se fosse implementado uma equalização que gerasse ganho nas maiores frequências desejadas, pois em geral, esses sinais correspondentes a motores em rotação constante possuem as maiores frequências com pouca amplitude sendo mais difícil de ressaltá-las somente usando a atenuação.

O aplicativo confeccionado foi um acréscimo muito interessante no projeto. A interface do usuário com o sistema traz a possibilidade de personalização por parte de quem for utilizar e

se mostrou altamente funcional com respostas rápidas comunicadas via Bluetooth, além de apresentar um design prático.

Este trabalho de conclusão de curso foi de suma importância ao autor no que tange ao conhecimento adquirido sobre leitura e manipulação digital de sinais e o seu funcionamento encoraja a realização de projetos futuros com a mesma finalidade, já que trata de um assunto que será abordado significativamente no futuro.

REFERÊNCIAS

- BIANCHI, A. J. **Processamento de áudio em tempo real em dispositivos não convencionais**. USP. São Paulo. 2011.
- BONFIM, M. **Medidas Elétricas: Conversores Digital/Analógico**. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, p. 46. 2002.
- CAPELLI, A. **Eletroeletrônica automotiva: Injeção eletrônica, arquitetura do motor e sistemas embarcados**. 1ª. ed. São Paulo : Érica Ltda, 2010.
- CIRINO, W. D. S. Teleco. **Filtro Digital Estudo de Caso de Projeto e Implementação**, 2007. Disponível em: <<http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialfiltrodig/>>. Acesso em: 11 maio 2018.
- DA SILVA, E. M. M.; RIBEIRO, M. S. C.; DOS SANTOS, S. A. B. **Os motores em engenharia mecânica - motores de combustão interna**. Universidade do Porto. Porto. 2015.
- DICKASON, V. **Loudspeaker Design Cookbook**. 7º. ed. Peterborough: Audio Amateur Press, 2006.
- DINIZ, P. S. R.; DA SILVA, E. A. B.; NETTO, S. L. **Processamento Digital de Sinais**. 2ª. ed. Porto Alegre : Bookman, 2014.
- FONSECA, R. L. G1 - Globo. **Tire dúvidas sobre o sistema de escapamento do carro**, 2009. Disponível em: <<http://g1.globo.com/Noticias/Carros/0,MUL1097748-9658,00-TIRE+DUVIDAS+SOBRE+O+SISTEMA+DE+ESCAPAMENTO+DO+CARRO.html>>. Acesso em: 12 Abril 2018.
- GARATTONI, B. Quatro Rodas. **Os segredos dos roncos dos motores**, 2015. Disponível em: <<https://quatrorodas.abril.com.br/auto-servico/os-segredos-dos-roncos-dos-motores/>>. Acesso em: 26 Março 2018.
- GERGES, S. N. Y. **Ruido fundamentos e controle**. 1ª. ed. Florianópolis: S. N. Y. Gerges, 1992.
- GUEDES, K. B. **Simulação Eficiente do Sistema Elétrico de Potência Utilizando Filtragem Digital Multitaxa**. PUC-Rio. Rio de Janeiro. 2002.
- IEA. Internacional Energy Agency. **Global EV Outlook 2017**, 2017. Disponível em: <<https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/GlobalEVOutlook2017.pdf>>. Acesso em: 13 Abril 2018.
- MARBJERG, G. **Noise from eletric vehicles - a literature survey**. Vejdirektoratet. Copenhagen. 2013.

MICROCHIP. **Datasheet: MCP41XXX/42XXX Single/Dual Digital Potentiometer with SPI Interface**. Eletronic Publication. [S.l.], 2003.

MOURA, M. Época, Globo. **A disparada do carro elétrico**, 2017. Disponível em: <<https://epoca.globo.com/tecnologia/noticia/2017/10/disparada-do-carro-eletrico.html>>.

Acesso em: 03 Abril 2018.

NALON, J. A. **Introdução ao processamento digital de sinais**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Ltda, 2013.

NHTSA. National Highway Traffic Safety Administration. **Minimum Sound Requirements for Hybrid And Electric Vehicles**, 2016. Disponível em: <<https://www.nhtsa.gov/sites/nhtsa.dot.gov/files/documents/812347-minimumsoundrequirements.pdf>>. Acesso em: 14 Maio 2018.

OKAWA. Okawa Eletric Design. **Filter Design and Analysis**, 2004. Disponível em: <<http://sim.okawa-denshi.jp/en/Sallen3tool.php>>. Acesso em: 12 Setembro 2018.

OLIVEIRA, C. A. D.; ROSA, A. D. **Motores de combustão interna: álcool e gasolina**. Santa Maria: Senai, 2003.

OPPENHEIM, A. V.; SCHAFER, R. W. **Processamento em Tempo Discreto de Sinais**. 3^a. ed. São Paulo : Pearson Education do Brasil, 2012.

PINHEIRO, C. A. M.; MACHADO, J. B.; FERREIRA, L. H. D. C. **Sistemas de controles digitais e processamento de sinais projetos, simulações e experiências de laboratório**. 1^a. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2017.

RASPBERRY PI Foundation. **Raspberry PI 3 Model B+**, 2016. Disponível em: <<https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b-plus/>>. Acesso em: 12 Maio 2018.

ROSENFELD, J. Rosenfeld Injury Lawyers LLC. **Green and silent but are eletric cars proving dangerous for pedestrians**, 2015. Disponível em: <<https://www.rosenfeldinjurylawyers.com/news/green-and-silent-but-are-electric-cars-proving-dangerous-for-pedestrians/>>. Acesso em: 16 Abril 2018.

SILVA, C. W. **Vibrations: Fundamentals and Praticce**. 1^a. ed. Boca Raton: CRC Press LLC, 2000.

SOUSA, F. **Equalização de Sinais de Áudio**. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2004.

TEXAS_INSTRUMENTS. **Datasheet Tiva TM4C123GH6PM Microcontroller**. Eletronic Publication: [s.n.], 2014.

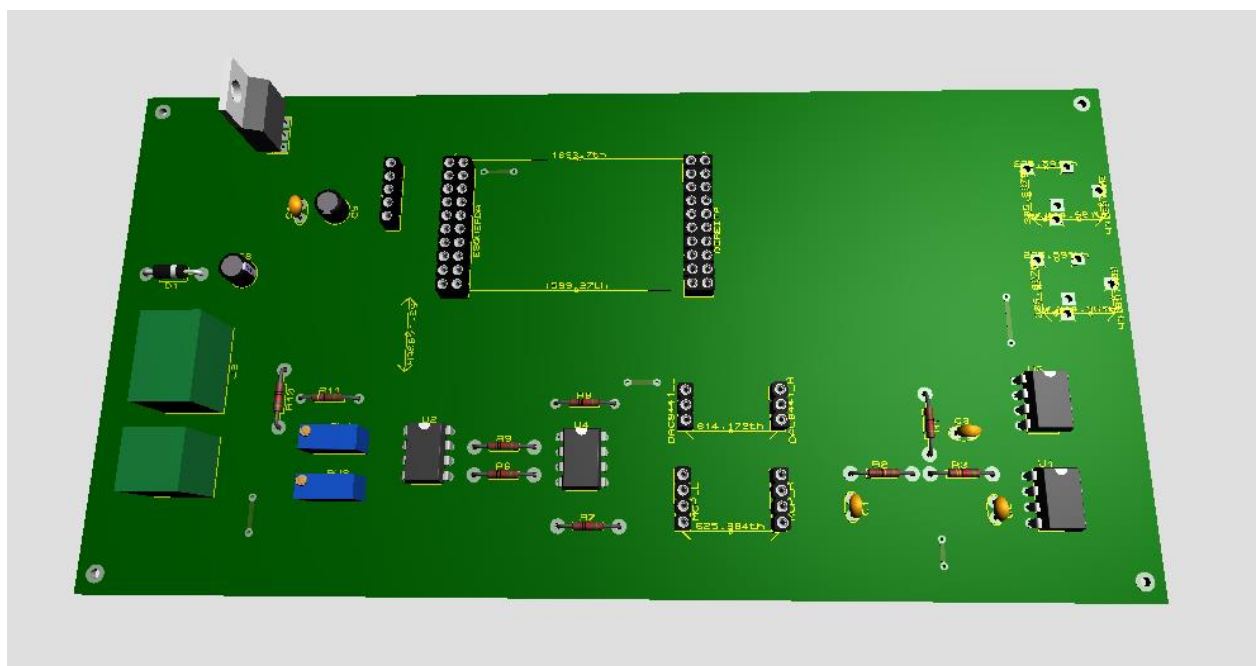
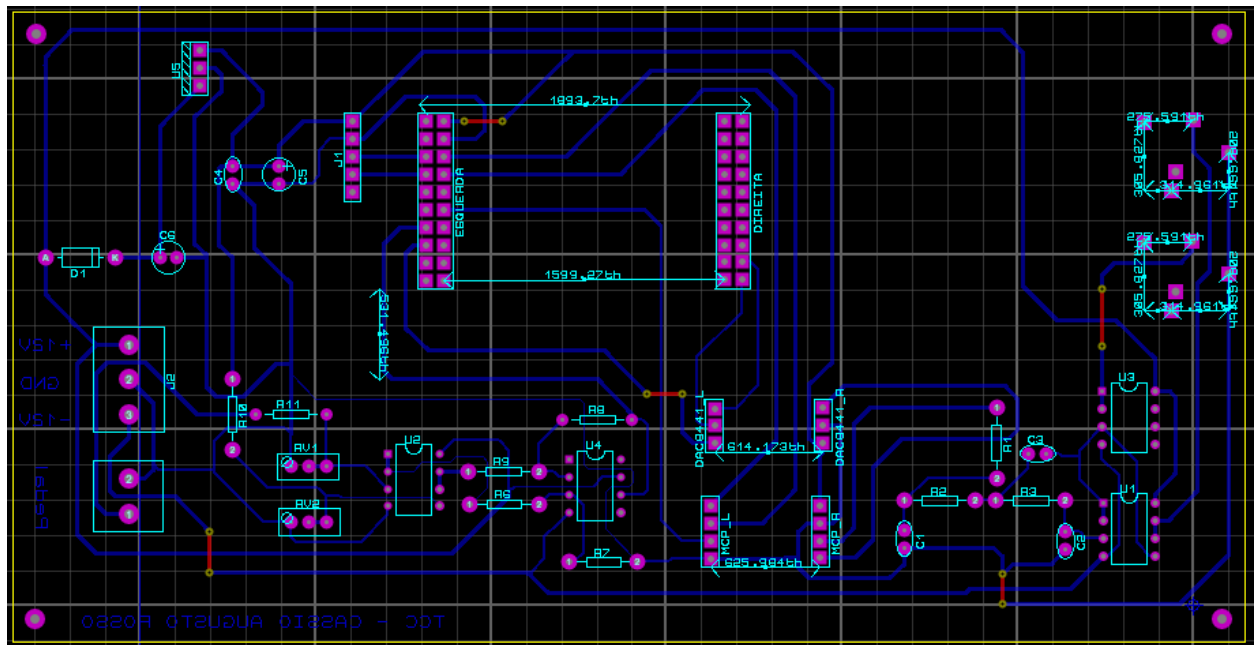
TEXAS_INSTRUMENTS. **Datasheet: DAC8x11 Digital-to-Analog Converter**. Eletronic Publication. [S.l.]. 2015.

WELLE, D. G1 - Globo. **Frota mundial de carros cresce 55% em um ano**, 2018. Disponível em: <<https://g1.globo.com/carros/noticia/frota-mundial-de-carros-eletricos-cresce-55-em-um-ano.ghtml>>. Acesso em: 15 Abril 2018.

WU, S. **Engine sound simulation and generation in driving**. **Master Theses**. Missouri University of Science and Technology. [S.l.]. 2016.

APÊNDICE B – LAYOUT PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO

Neste apêndice são apresentados o layout com as trilhas e posições dos componentes utilizados no projeto, além do modelo 3D da PCI projetada no software Proteus.



APÊNDICE C – FUNÇÃO DE INTERRUPTÃO CANAL A/D

Neste apêndice está anexada a função de interrupção escrita em linguagem C para execução no microcontrolador TM4C123G. Essa função é responsável por obter o nível de tensão do acelerador eletrônico, calcular uma rotação linear e a resistência do potenciômetro digital, para então chamar a função que calculará o tempo entre amostras do sinal desejado.

```
void ADC1_S2_IntHandler (void){
    ADCIntClear(ADC1_BASE, 2);           // Limpeza flag de interrupção
    ADCSequenceDataGet(ADC1_BASE, 2, ADC1Value); // Captura valor no A/D
    rpm_ad=ADC1Value[0]*5000/4095 + 1000; // RPM de 1000 a 6000
    if(rpm<rpm_ad){                       // Delay no crescimento de RPM
        rpm=rpm+3;
    }
    else if(rpm>rpm_ad){                   // Delay no decréscimo de RPM
        rpm=rpm-2;
    }
    volume = (0.025*rpm) + 105;           // Potenciômetro digital
    SSIDataPut(SSI3_BASE, (volume+4352));
    switch(som)                            //Escolha do som
    {
        case 0: break;
        case 1: tempo_mr2_1632rpm (); break;
        case 2: tempo_k20_1925 (); break;
        case 3: tempo_e30_1793rpm (); break;
        case 4: tempo_shelby_1636 (); break;
        case 5: tempo_lancer_987 (); break;
        default: break;
    }
}
```

APÊNDICE D – EQUAÇÕES EM PROGRAMA DO TEMPO ENTRE AMOSTRAS

Neste apêndice são apresentadas as equações feitas pelo microcontrolador para cada áudio gravado correspondente ao som de um motor específico. Essa equação tem a finalidade de definir o tempo entre amostras do sinal realizando a alteração da frequência do som.

```
void tempo_e30_1793rpm(void)  
{  
tempo = ((-0.0039*rpm) + 37.3);  
}
```

```
void tempo_lancer_987(void)  
{  
tempo = ((-0.0027*rpm) + 31.4);  
}
```

```
void tempo_mr2_1632rpm(void)  
{  
tempo = ((-0.0036*rpm) + 38.71);  
}
```

```
void tempo_k20_1925(void)  
{  
tempo = ((-0.003*rpm) + 34.86);  
}
```

```
void tempo_shelby_1636(void)  
{  
tempo = ((-0.0026*rpm) + 33.017);  
}
```