

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
ENGENHARIA ELÉTRICA

MURILO MONTEIRO CINEL

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE
SINAIS VIBRATÓRIOS DAS PREGAS VOCAIS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO
2017

MURILO MONTEIRO CINEL

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE
SINAIS VIBRATÓRIOS DAS PREGAS VOCAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Rogério Scalassara
Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Maria Eugenia Dajer

CORNÉLIO PROCÓPIO
2017



Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Cornélio Procópio
Departamento Acadêmico de Elétrica
Curso de Engenharia Elétrica



FOLHA DE APROVAÇÃO

Murilo Monteiro Cinel

Desenvolvimento de um sistema de aquisição de sinais vibratórios das pregas vocais

Trabalho de conclusão de curso apresentado às hs do dia como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista no programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

Prof(a). Dr(a). Paulo Rogério Scalassara - Presidente (Orientador)

Prof(a). Dr(a). María Eugenia Dajer - (Coorientador)

Prof(a). Dr(a). Bruno Catarino Bispo - (Membro)

Prof(a). Dr(a). André Sanches Fonseca Sobrinho - (Membro)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por cada detalhe de amor manifestado em minha vida, permitindo que eu alcançasse mais um objetivo.

Aos meus pais, Luiz Cinel e Rose Cinel e irmã, Mayara Cinel, pelo apoio, paciência, companheirismo e amor incondicionais em todos os momentos da minha vida, e a toda minha família, por participarem e torcerem constantemente por minhas conquistas.

Agradeço à minha namorada Bruna, que mesmo longe foi a pessoa que se fez mais próxima durante toda a graduação. Obrigado pelos conselhos, pela motivação, paciência e pelo imenso amor que me dedica.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Paulo Rogério Scalassara, exemplo de professor e pesquisador, por ter acreditado e confiado em mim desde o início, por todas as oportunidades, contribuições e direcionamentos.

Agradeço à Prof^a. Dr^a. María Eugenia Dajer, por estar sempre disposta a ajudar, sendo uma grande motivadora e incentivadora. Obrigado pela confiança e pela amizade que construímos.

Agradeço à minha banca avaliadora, professores André Sanches e Bruno Bispo, pela amizade, apoio, atenção e conselhos.

Agradeço a todos os professores e alunos do LPSA, que foram companhias diárias nestes anos. Ao professor Cristiano, ao Herman, Lígia e Letícia pela grande amizade, motivação e apoio sempre. E a todos do CIPECA, em especial ao Murillo, Eduardo e Enrique pela parceria.

Ao meu amigo André Feracin, pelos ensinamentos, pela paciência e profissionalismo que me transmitiu. Meu professor fora das salas de aula.

A todos os membros da REPELT, nossa querida “República das Elétrica”, amigos que a vida me deu que posso contar para sempre.

Agradeço à UTFPR, instituição pela qual tenho grande respeito e orgulho de pertencer, como aluno e servidor, e a todos os amigos que conquistei durante todos esses anos.

“Que o riso seja sua fala
toda vez que sua voz acabar.”

Guilherme de Sá

RESUMO

CINEL, Murilo. M. **Desenvolvimento de um sistema de aquisição de sinais vibratórios das pregas vocais**. 2017. 49 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2017.

Este trabalho tem como objetivo desenvolver um sistema de aquisição de sinais para ser utilizado em um protótipo de baixo custo de um dosímetro vocal. Este instrumento clínico possibilita o monitoramento e registro de informações de sinais vibratórios das pregas vocais de forma não invasiva. O dosímetro pode ser dividido em três sistemas: aquisição, armazenamento e processamento de sinais. O sistema de aquisição, foco deste projeto, utiliza um acelerômetro que é fixado na pele do pescoço, abaixo da laringe, para medir a vibração das pregas vocais e um microcontrolador para o controle do processo por meio do protocolo de comunicação. O desenvolvimento deste sistema foi realizado testando e comparando os componentes disponíveis para a operação. Nos primeiros testes foram utilizados o microcontrolador ATmega328 (Arduino Nano) e o acelerômetro ADXL345, com os protocolos de comunicação I²C e SPI. No primeiro caso, constatou-se a baixa eficiência do protocolo de comunicação quando analisada a taxa de amostragem do sinal. Já com o SPI, foi possível alcançar uma taxa de saída superior, mas, não a máxima, devido as limitações do Arduino. O teste utilizando o PIC18F4550 e o ADXL345 em SPI, tinha como objetivo possibilitar a análise da qualidade do sinal, que seria coletado também em taxa máxima, afim de comparar os microcontroladores quanto as suas capacidades de processamento. Por último, seriam utilizados o PIC18F4550 com o sensor KX122-1037 também em SPI, que seria a combinação mais promissora devido à capacidade de processamento e desempenho do acelerômetro.

Palavras-chave: Dosímetro. Pregas vocais. Aquisição de Sinais. Acelerômetro.

ABSTRACT

CINEL, Murilo. M. **Development of aquisition sistem of vocal folds vibration signals.** 2017. 49 f. Course Completion Work (Undergraduate) - Electrical Engineering. Federal Technological University of Paraná. Cornélio Procópio, 2017.

The propose of this study is to develop a signal acquisition system to be used in a low cost vocal dosimeter prototype. This clinical tool enables the monitoring and recording of vocal fold vibratory signals data in a noninvasive way. The dosimeter can be divided into three systems: acquisition, storage and signal processing. The acquisition system, the focus of this project, uses an accelerometer that is fixed to the skin of the neck, below the larynx, to measure the vibration of the vocal folds and a microcontroller to control the process through the communication protocol. The development of this system was performed by testing and comparing the components available for the operation. In the first tests, the microcontroller ATmega 328 (Arduino nano) and the accelerometer ADXL345, with the communications protocols I²C and SPI were used. Despite the efficiency of SPI over I2C, arduino did not allow it to reach the maximum output rate allowed by the sensor. The test using the PIC18F4550 and ADXL345 in SPI, as well as how to enable a signal quality analysis, which is also collected at maximum rate, in order to compare the microcontrollers as well as their processing capacities. Finally, the PIC18F4550 would be used with the KX122-1037 sensor also in SPI, which will be a more promising combination due to the processing capacity and performance of the accelerometer.

Keywords: Dosimeter. Vocal Folds. Vibratory signals. Accelerometer.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| FIGURA 1. ESQUEMÁTICO DAS ESTRUTURAS ENVOLVIDAS NA PRODUÇÃO VOCAL..... | 13 |
| FIGURA 2. IMAGENS DE VIDEOLARINGOSCOPIA DAS PREGAS VOCAIS EM POSIÇÃO DE FONEAÇÃO (A - FASE FECHADA DAS PREGAS) E RESPIRAÇÃO (B - FASE ABERTA DAS PREGAS)..... | 14 |
| FIGURA 3. DOSÍMETRO VOXLOG..... | 15 |
| FIGURA 4. SENSOR FIXADO NA POSIÇÃO DE GRAVAÇÃO..... | 16 |
| FIGURA 5. SENTIDOS DOS EIXOS NO ACELERÔMETRO TRIAXIAL..... | 17 |
| FIGURA 6. CARACTERÍSTICAS DE ACELERÔMETROS RELATIVOS, EM RELAÇÃO À ACELERAÇÃO GRAVITACIONAL..... | 18 |
| FIGURA 7. PROTOCOLO DE COMUNICAÇÃO I ² C..... | 20 |
| FIGURA 8. COMUNICAÇÃO I2C – OPERAÇÃO DE ESCRITA..... | 20 |
| FIGURA 9. COMUNICAÇÃO I2C – OPERAÇÃO DE LEITURA..... | 21 |
| FIGURA 10. PROTOCOLO DE COMUNICAÇÃO SPI..... | 22 |
| FIGURA 11. CONECTORES USB DOS TIPOS "A" E "B"..... | 23 |
| FIGURA 12. ETAPAS CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO DO DOSÍMETRO..... | 24 |
| FIGURA 13. DIAGRAMA DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO..... | 25 |
| FIGURA 14. ACELERÔMETRO DIGITAL ADXL345..... | 25 |
| FIGURA 15. ACELERÔMETRO KX122-1037..... | 26 |
| FIGURA 16. SAÍDA E ORIENTAÇÃO DA TERRA DO ACELERÔMETRO KX122-1037..... | 26 |
| FIGURA 17. CIRCUITO DE INTERFACE DO KX122-1037..... | 27 |
| FIGURA 18. DESCRIÇÕES DOS PINOS DO KX122-1037..... | 28 |
| FIGURA 19. PLACAS DE INTERFACE KX122-1037 NO SOFTWARE PROTEUS..... | 28 |
| FIGURA 20. ACELERÔMETRO BU-27135..... | 29 |
| FIGURA 21. ARDUINO NANO V3.1..... | 30 |
| FIGURA 22. MICROCONTROLADOR PIC18F4550..... | 31 |
| FIGURA 23. CIRCUITO MICROCONTROLADOR PIC18F4550..... | 32 |
| FIGURA 24. CIRCUITO DE GRAVAÇÃO DO PIC..... | 33 |
| FIGURA 25. CIRCUITO DE COMUNICAÇÃO USB..... | 33 |
| FIGURA 26. CIRCUITO DE FONTE PARA O SENSOR ACELERÔMETRO..... | 33 |
| FIGURA 27. CIRCUITO DO LED DE SUPERVISÃO..... | 34 |
| FIGURA 28. PLACA DE INTERFACE PIC EM VISTA 3D NO <i>PROTEUS</i> | 34 |
| FIGURA 29. TESTE DE AQUISIÇÃO DE SINAIS VIBRATÓRIOS..... | 36 |
| FIGURA 30. ARDUINO NANO E SENSOR ACELERÔMETRO ADXL345..... | 37 |
| FIGURA 31. SINAIS DE SCL E SDA UTILIZANDO O ARDUINO E ADXL345 EM I2C..... | 38 |
| FIGURA 32. DADOS COLETADOS COM O ACELERÔMETRO ADXL345 EIXOS X, Y E Z..... | 38 |
| FIGURA 33. SINAL DE DADOS DO ADXL345, EIXO Z. (I ² C)..... | 39 |
| FIGURA 34. SINAIS DE CS, SCL, SDO E SDI UTILIZANDO O ARDUINO E ADXL345..... | 39 |
| FIGURA 35. DADOS COLETADOS COM O ADXL345 E O ARDUINO, EM SPI..... | 40 |
| FIGURA 36. DADOS COLETADOS COM O ADXL345 E O ARDUINO, EM SPI..... | 41 |
| FIGURA 37. SINAL DE DADOS DO ADXL345, EIXO Z. (SPI)..... | 41 |
| FIGURA 38. PLACA DE INTERFACE DO PIC E GRAVADOR PICKIT3..... | 42 |
| FIGURA 39. PIC 18F4550 COM ADXL345 EM PROTOCOLO SPI..... | 42 |
| FIGURA 40. SINAIS DE CS, SCL, SDO E SDI UTILIZANDO O PIC18F4550 E ADXL345..... | 43 |
| FIGURA 41. PLACAS ACELERÔMETRO KX122-1037..... | 44 |
| FIGURA 42. PIC 18F4550 COM KX122-1037 EM PROTOCOLO SPI..... | 44 |

LISTA DE SIGLAS

| | |
|------------------|--|
| MEMS | <i>Micro Electro Mechanical Systems</i> |
| CPU | <i>Central Processor Unit</i> |
| SMD | <i>Surface Mount Device</i> |
| PIC | <i>Programmable Interface Controller</i> |
| SPI | <i>Serial Peripheral Interface</i> |
| I ² C | <i>Inter-Integrated Circuit</i> |
| ACK | <i>Acknowledge</i> |
| NACK | <i>Noacknowledge</i> |
| MOSI/SDI | <i>Master Output</i> |
| MISO/SDO | <i>Master Input</i> |
| CLK | <i>Clock</i> |
| SCK | <i>Serial Clock</i> |
| SCL | <i>Serial Clock</i> |
| SDO | <i>Slave Data output</i> |
| SDA | <i>Serial Data</i> |
| SDI | <i>Slave Data Input</i> |
| SS | <i>Slave Select</i> |
| USB | Universal system bus |
| USART | <i>Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter</i> |
| MBS | Most significant bit |
| LBS | <i>Least significant bit</i> |
| MSSP | Master Synchronous Serial Port |
| SDHC | <i>Secure Digital High Capacity</i> |
| SDXC | <i>Secure Digital Extended Capacity</i> |
| F _s | Frequência de amostragem |
| B | Banda máxima |
| VCC | Tensão Corrente Contínua |
| GND | <i>Ground</i> |
| g | Aceleração gravitacional |

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 11 |
| 1.1 Objetivos | 12 |
| 1.2 Estrutura..... | 12 |
| 2 ANÁLISE DE SINAIS DE VOZ | 13 |
| 2.1 Produção vocal..... | 13 |
| 2.2 Distúrbios vocais e disfonia | 14 |
| 3 DOSÍMETRO | 15 |
| 3.1 Sensor Acelerômetro..... | 16 |
| 3.2 Microcontroladores..... | 18 |
| 3.3 Protocolos de comunicação serial síncrona | 19 |
| Protocolo I ² C..... | 19 |
| Protocolo SPI | 21 |
| 3.4 Comunicação serial | 22 |
| USART..... | 22 |
| USB | 23 |
| 4 MATERIAIS E MÉTODOS | 24 |
| 4.1 Acelerômetros | 25 |
| ADXL345 | 25 |
| KX122-1037 | 26 |
| BU-27135..... | 28 |
| 4.2 Microcontroladores..... | 29 |
| Arduino Nano V3.1..... | 29 |
| PIC 18F4550..... | 30 |
| 4.3 Placa de desenvolvimento para o PIC18F4550 | 32 |
| 4.4 Metodologia para aquisição de sinais | 35 |
| 5 RESULTADOS | 36 |
| 5.1 Arduino Nano e sensor acelerômetroADXL345..... | 36 |
| 5.2 PIC18F4550 e sensor acelerômetro ADXL345 | 42 |
| 5.3 PIC18F4550 e sensor acelerômetro KX122-1037 | 43 |
| 6 CONCLUSÃO | 45 |
| REFERÊNCIAS | 46 |

1 INTRODUÇÃO

A voz é um som produzido pelas vibrações das pregas vocais localizadas na laringe. É uma ferramenta de comunicação exclusiva para cada pessoa que possibilita a interação na sociedade por meio da expressão de ideias, emoções e até do exercício de uma profissão (DAJER, 2010). A utilização da voz no ambiente profissional permite a transmissão de confiança, liderança, credibilidade e assertividade (IRIYA, 2014). Aproximadamente 70% da população economicamente ativa necessita da voz para realizar seu trabalho, o que pode indicar maiores incidências de distúrbios de voz. Alterações na voz podem, portanto, impactar de forma negativa as relações pessoais e profissionais, o que demonstra que a qualidade vocal influencia a qualidade de vida do indivíduo (CATANI, 2015).

Profissionais que utilizam a voz como instrumento de trabalho estão mais propícios a apresentarem distúrbios vocais (FERRACCIU e ALMEIDA, 2014). Dentre eles, os que apresentam maior risco de desenvolver tais distúrbios são os professores e cantores (CATANI, 2013) e (GILLIVAN-MURPHY et al., 2006). Os sintomas mais comuns desses distúrbios são: rouquidão, tosse, dor de garganta/queimação, fadiga vocal, garganta seca e perda de voz (ZAMBON et al., 2012).

Para um diagnóstico preciso de distúrbio vocal, um exame clínico não é eficiente, pois avalia apenas uma situação ideal de uso vocal. É recomendável realizar uma avaliação do comportamento vocal em uma grande amostra de voz, durante um período prolongado de tempo. O médico otorrinolaringologista e/ou fonoaudiólogo precisam monitorar a utilização da voz do paciente em longo prazo, a fim de quantificar o tempo de fonação, o ciclo de dose e a distância de dose (TITZE, 2000). Fonação é o tempo que contém vibrações das pregas, o ciclo de dose é a estimativa do número de oscilações das pregas vocais durante um determinado período e a distância de dose é a distância total percorrida por elas durante um dia de trabalho (GAMA et al., 2016). Portanto, o monitoramento do comportamento vocal do profissional é fundamental para realizar diagnósticos mais precisos e, conseqüentemente, oferecer ao paciente um tratamento personalizado e efetivo (PATROCÍNIO et al, 2013).

A elaboração deste trabalho originou-se da necessidade da

construção de um equipamento clínico móvel de baixo custo, capaz de coletar de forma não invasiva as amostras necessárias para o diagnóstico e/ou a prevenção de patologias relacionadas à utilização não adequada da voz. Assim, será utilizado um sensor acelerômetro fixado na pele do pescoço, abaixo da laringe, em conjunto com um controlador, para captar todas as vibrações provenientes das pregas vocais durante um determinado tempo e armazená-las em um dispositivo de memória para análises posteriores.

1.1 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver um sistema de aquisição de sinais vibratórios para ser utilizado na construção de um dosímetro.

Os objetivos específicos são:

- Estudar as características do sinal da voz humana e sua produção.
- Estudar e testar os sensores acelerômetros, microcontroladores e seus protocolos de comunicação.
- Construir um protótipo do sistema de aquisição de sinais vibratórios das pregas vocais.
- Realizar ensaios de aquisição dos sinais.

1.2 Estrutura

No segundo Capítulo são abordados conceitos da voz humana, produção vocal e características dos distúrbios vocais (disfonias). No terceiro Capítulo, são apresentadas informações sobre um dosímetro e descrição de todos os elementos que o compõe, como: sensor acelerômetro, microcontrolador e o dispositivo de armazenamento. No quarto Capítulo, apresentam-se os materiais e procedimentos necessários para realizar esta pesquisa. Os resultados obtidos serão apresentados no Capítulo 5, seguidos da conclusão no último Capítulo.

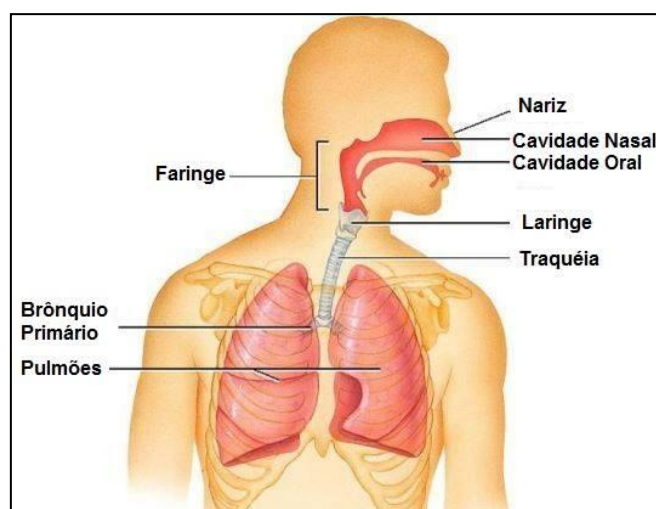
2 ANÁLISE DE SINAIS DE VOZ

A voz humana pode ser considerada uma das ferramentas de comunicação mais primárias e imediatas para a interação na sociedade (BEHLAU, 2004). Ela é uma emissão acústica voluntária, que envolve diversos fatores para sua produção (DAJER, 2010). A distribuição de energia de um sinal de voz humano se encontra na faixa de 40 Hz à 12 kHz, com uma maior concentração até 4 kHz. A maior parte da energia sonora da voz, assim como sua efetiva inteligibilidade estão entre as frequências de 300 Hz e 3.400 Hz.

2.1 Produção vocal

A voz humana, sob o aspecto fisiológico, é o som gerado pela passagem do ar pelas pregas vocais e que, posteriormente, sofre modificações nas cavidades de ressonância e estruturas articulatórias (CATANI, 2015). Para produzir um sinal de voz, é necessária a sincronia de diferentes sistemas e órgãos (DAJER, 2010). O sistema que produz a voz, representado na Figura 1, é composto por pulmões que produzem o ar, a laringe que o sonoriza com a vibração das pregas vocais devido à pressão do ar e o trato vocal, e as cavidades da garganta, nariz e boca que equalizam o som, aumentando e diminuindo algumas faixas de frequências.

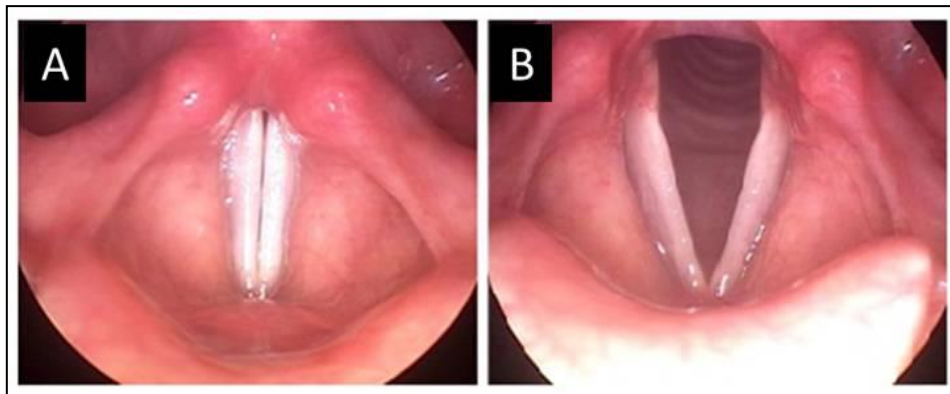
Figura 1. Esquemático das estruturas envolvidas na produção vocal.



Fonte: Adaptado de TORTORA, G. J. e GRABOWSKI, S. R. (2002)

No momento da fonação, quando as pregas vibram, elas ficam muito próximas uma da outra, conforme a Figura 2A. No momento da respiração, Figura 2B, as pregas vocais apresentam-se separadas e formam uma abertura entre elas. A frequência de vibração da mucosa da prega vocal está na faixa de 100-150 Hz no homem e 200-250 Hz na mulher (BEHLAU, 2001).

Figura 2. Imagens de videolaringoscopia das pregas vocais em posição de fonação (A - fase fechada das pregas) e respiração (B - fase aberta das pregas).



Fonte: Adaptado de BEHLAU (2001).

2.2 Distúrbios vocais e disfonia

A disfonia pode ser definida como um distúrbio na comunicação oral, em que a voz não consegue cumprir seu papel básico de transmissão da mensagem verbal e emocional do falante, causando implicações na vida social e profissional (BEHLAU, 2001).

A disfonia é um sintoma e não uma doença (NEMR et al., 2013). Pode ocorrer como resultado de uma interação entre fatores hereditários, comportamentais, estilo de vida e ocupacionais (ALVES et al., 2010). Esse sintoma costuma ser classificado em quatro graus de intensidade: grau leve – apresenta uma disfonia eventual ou quase imperceptível; grau moderado – a disfonia é percebida continuamente (voz audível, mas, com oscilações); grau intenso – a disfonia é constante (voz pouco audível) e grau extremo ou afonia – é a quase ausência de voz ou a ausência de voz (PRZYSIENZNY e PRZYSIENZNY, 2015).

Para que a disfonia seja diagnosticada, é necessário que uma grande amostra de informação da voz seja analisada. Um equipamento clínico responsável pela coleta de informação da voz é chamado dosímetro.

3 DOSÍMETRO

O dosímetro vocal é um instrumento portátil destinado a mensurar a vibração das pregas vocais ou dose vocal. Define-se dose como a quantidade de exposição do tecido das pregas vocais à vibração, seja por vocalização alta ou prolongada ao longo do tempo (PAPOLO et al., 2004). A dose vocal pode ser dividida em: temporal, cíclica ou de distância (GAMA et al., 2016).

Os parâmetros vocais estimados a partir da vibração das pregas são: frequência fundamental, intensidade ou altura da voz (medida como nível de pressão sonora) e tempo de fonação (PAPOLO et al., 2005). Na Figura 3, apresenta-se um dosímetro chamado VoxLog, comercializado como um analisador de voz portátil, construído pela *School of Computer Science and Communication (KTH)*, considerada uma das principais instituições de ensino e pesquisa em tecnologia da informação da Suécia.

Figura 3. Dosímetro VoxLog.



Fonte: KTH – School of Computer Science and Communication (2016).

A coleta de informação de voz com o dosímetro é feita de maneira não invasiva. Consiste em um sensor acelerômetro posicionado no pescoço, região da laringe, conforme a Figura 4, que mede a vibração da pele relacionada às pregas vocais. Um circuito de interface que realiza o controle, processamento e comunicação do sensor com um dispositivo de memória possibilitando a aquisição e o armazenamento da informação. Antes de se utilizar o dosímetro, é

necessário efetuar a calibração para cada usuário utilizando um medidor de pressão sonora e um microfone (METHA et al., 2013).

O dosímetro pode ser dividido em três blocos funcionais:

- ✓ **Sistema de aquisição de sinais:** constituído por todos os dispositivos necessários para a coleta de dados vocais, sensor acelerômetro e microcontrolador, considerando os protocolos de comunicação;
- ✓ **Sistema de armazenamento:** responsável por armazenar o sinal proveniente do acelerômetro, constituído por uma memória *Flash*;
- ✓ **Sistema de processamento de sinais:** necessário para analisar os dados, eliminar intervalos de ausência de sinais vocais e movimentos e/ou vibrações que não são provenientes da fala.

Figura 4. Sensor fixado na posição de gravação.



Fonte: MEHTA et al (2013).

3.1 Sensor Acelerômetro

O sensor acelerômetro é o dispositivo responsável por medir a aceleração dinâmica, resultante do movimento ou choque, e a aceleração estática, como a gravidade (*Datasheet ADXL345*, 2009). A forma do sinal de saída pode determinar a classificação de um acelerômetro em analógico ou

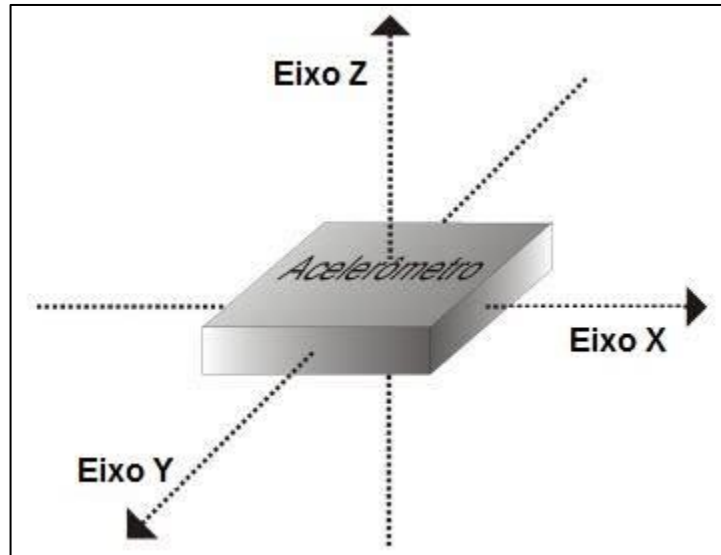
digital. O acelerômetro analógico caracteriza-se por um sinal que pode assumir valores intermediários em uma determinada faixa, assim, se a aceleração sofrida pelo componente permanece constante, a tensão na saída também se mantém constante. O sensor analógico necessita de um conversor A/D (Analógico/Digital). Os acelerômetros digitais, por sua vez, convertem internamente o sinal analógico para um sinal digital, de acordo com a aceleração sofrida.

A posição dos eixos de um acelerômetro está indicada na Figura 5. Comercialmente, existem sensores que possibilitam a leitura da aceleração em:

- um eixo (X ou Z);
- dois eixos (XY ou XZ); ou
- três eixos (XYZ).

É importante destacar que cada eixo possui uma saída própria, o que permite o monitoramento da aceleração sofrida pelo componente em cada uma delas.

Figura 5. Sentidos dos eixos no acelerômetro triaxial.

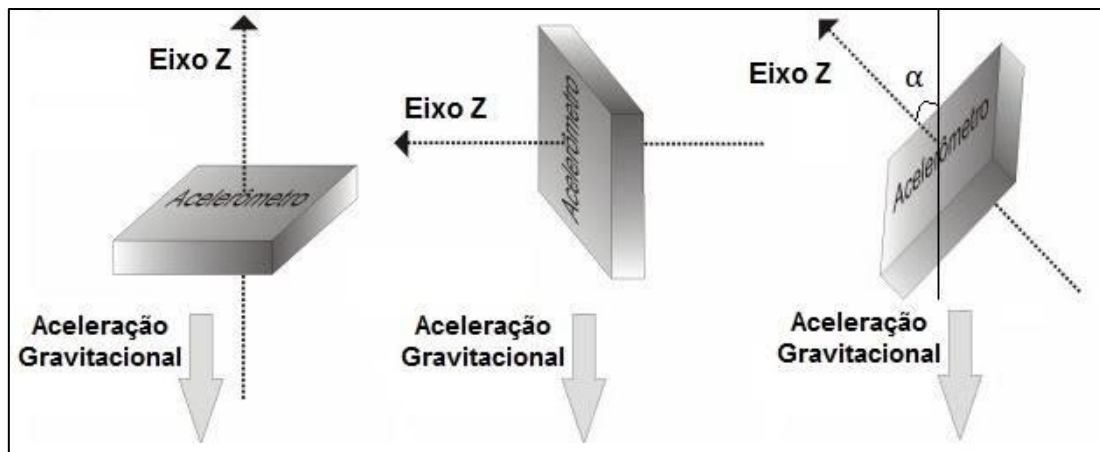


Fonte: Autoria própria

Os acelerômetros podem ser absolutos (suas medidas são efetivamente o valor de aceleração) ou relativos (cuja aceleração é estabelecida com base na gravidade da terra, $g = 9,8 \text{ m/s}^2$). Nos acelerômetros relativos existe um valor limite de aceleração que pode ser medido. O funcionamento do

acelerômetro relativo pode ser entendido com a sequência apresentada na Figura 6.

Figura 6. Características de acelerômetros relativos, em relação à aceleração gravitacional.



Fonte: Autoria própria

Considerando um acelerômetro, configurado para o valor limite de 1g, com um único eixo (nesse caso o “Z”) e em repouso, sujeito apenas à aceleração estática, se este eixo estiver posicionado para o sentido da aceleração gravitacional, medirá o valor da aceleração, neste caso +g. Mas, quando esse eixo estiver perpendicular à ação da gravidade, não sofrerá nenhuma aceleração, sendo zero, e, no último caso, quando posicionado num determinado ângulo α , Figura 6, a aceleração em “Z” estará relacionada ao cosseno do α , conforme a Equação (1):

$$a = g * \cos(\alpha) \quad (1)$$

Estes acelerômetros são considerados do tipo MEMS (*Micro Electro Mechanical Systems*), por serem construídos em escala micrométrica (TEVES, 2013).

3.2 Microcontroladores

O microcontrolador é considerado um computador em um *chip*. É um circuito eletrônico integrado composto por uma CPU (*Central Processor Unit*), memórias, sistema de *clock* e portas de entradas e saídas. Vários deles possuem

diversos periféricos internos como interfaces de comunicação, conversores A/D e temporizadores. Ou seja, é um sistema computacional completo, assim, por meio de sua programação é possível alcançar diversas aplicações.

Os microcontroladores são muito utilizados nas indústrias, pois além de possuírem tamanho reduzido para sua função e baixo consumo de energia, também apresentam baixo custo. Sua capacidade de processamento e armazenamento varia de acordo com o modelo/família (SANTOS, 2009).

3.3 Protocolos de comunicação serial síncrona

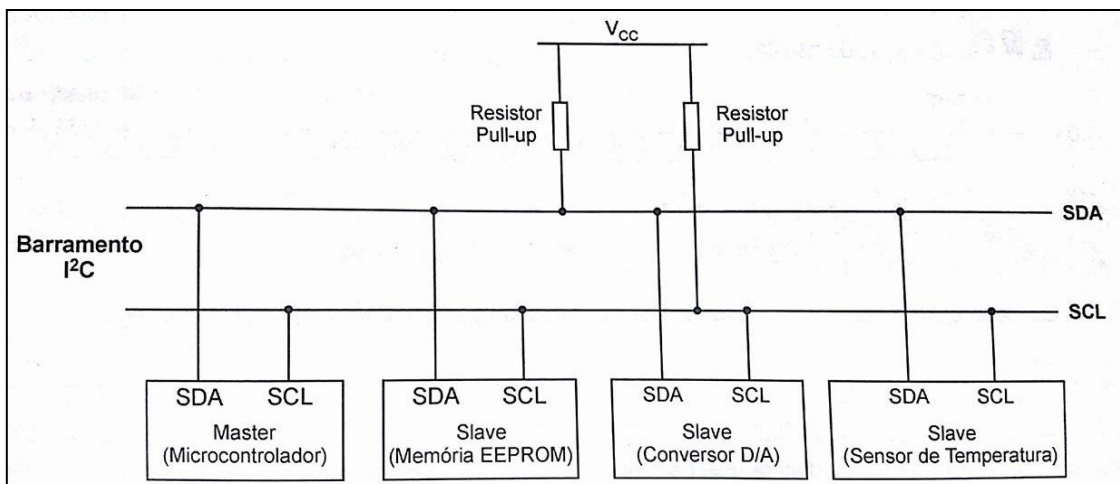
O conjunto de normas utilizado para gerenciar a permuta de informações entre indivíduos em um sistema é denominado protocolo de comunicação. Os protocolos de comunicação serial se dividem em: comunicação de dados assíncrona e síncrona. Como protocolos de comunicação serial síncronos têm-se: SPI (*Serial Peripheral Interface*) e I²C (*Inter-Integrated Circuit*). Ambos os protocolos são bidirecionais e amplamente utilizados em componentes eletrônicos (ONOFRE, 2014).

- **Protocolo I²C**

O I²C, conhecido como protocolo de comunicação síncrono Mestre/Escravo, possibilita a interconexão com diversos dispositivos, onde um é denominado mestre (microcontrolador) e os demais escravos (sensores, memória), conforme a Figura 7. Este protocolo possui comunicação em duas vias: *Clock* (SCL) que é controlado pelo dispositivo mestre, responsável pela transmissão do sinal de *clock* do barramento (geralmente padronizada em taxas de 100 kbps, 400 kbps ou 1 Mbps), e a via de dados (SDA) que é bidirecional e transporta a informação (MIYADAIIRA, 2011). As vias de comunicação estão conectadas por resistores de *pull-up* (1 k a 10 kOhm) na tensão DC de alimentação, os quais são fundamentais para o funcionamento deste protocolo.

Em funcionamento, considerando a comunicação entre um mestre e um escravo, a operação de escrita, apresentada na Figura 8, é iniciada com um bit de *Start* enviada pelo mestre.

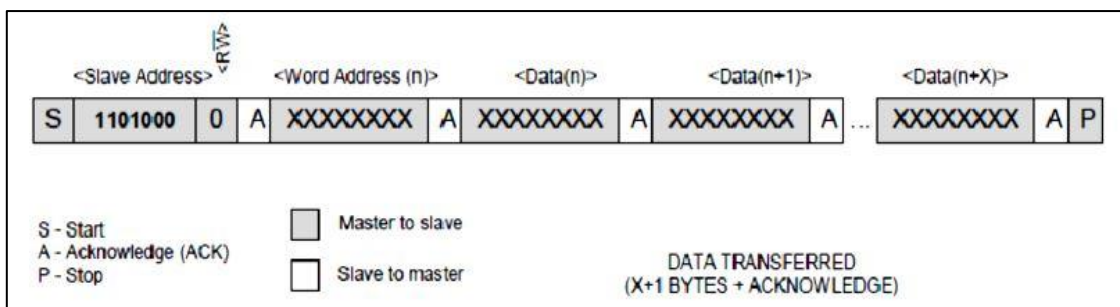
Figura 7. Protocolo de comunicação I²C.



Fonte: MIYADAIRA (2011).

No primeiro *byte*, define-se o endereço do dispositivo a ser acessado. No oitavo bit, declara-se se a instrução é de leitura (“1”) ou de escrita (“0”). O nono bit é a resposta ACK (*Acknowledge*) do escravo, representa a confirmação se o dado foi corretamente recebido. Em seguida, o mestre envia um *byte* definindo um endereço de memória dentro do dispositivo, que também é confirmado por um ACK. A seguir, cada *byte* enviado é armazenado em um endereço sequencial, até que o mestre encerre a comunicação através de um bit *Stop*.

Figura 8. Comunicação I²C – Operação de escrita.

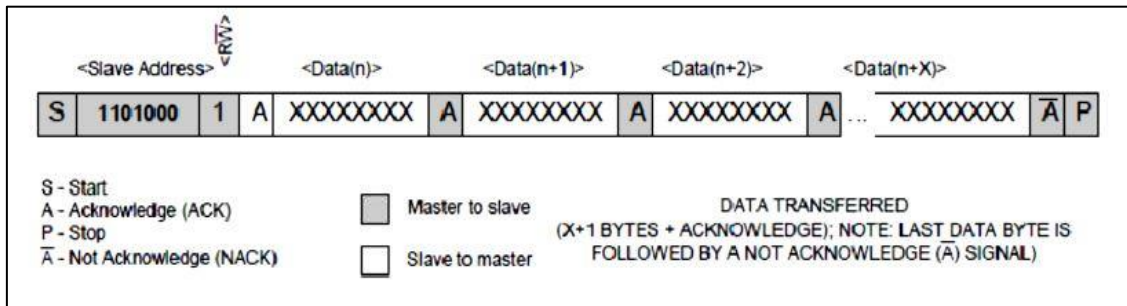


Fonte: EXSTO Tecnologia (2009).

Na operação de leitura, conforme a Figura 9, o processo inicia com um bit *Start*. Envia-se o endereço do dispositivo (7 bits) e o oitavo bit em “1”, indicando a leitura. O escravo responde com ACK e passa a enviar seus dados sequencialmente. A cada *byte* enviado pelo escravo, o mestre confirma o

recebimento. No último *byte*, o mestre responde com um NACK, sinalizando o fim do envio de dados.

Figura 9. Comunicação I2C – Operação de leitura.



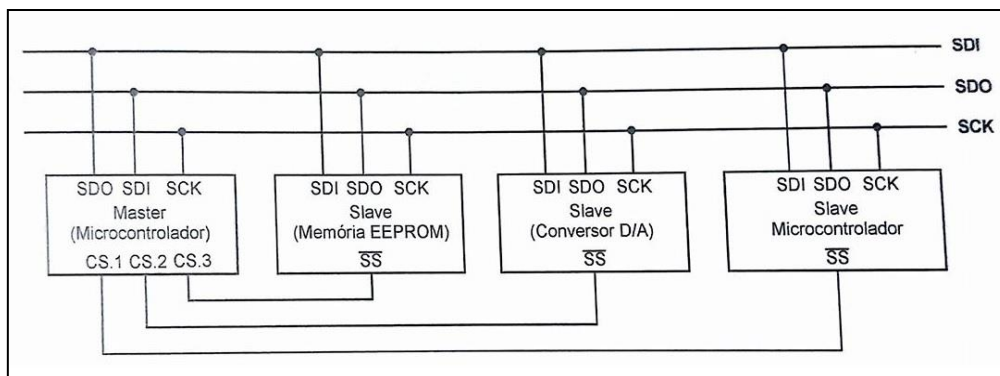
Fonte: EXSTO Tecnologia (2009).

- **Protocolo SPI**

O SPI suporta um dispositivo mestre e um ou mais escravos e opera no modo *full-duplex* podendo alcançar velocidades de até 10 MHz, quando utilizando o microcontrolador PIC18F4550. (MIYADAIRA, 2011). O sistema consiste em quatro linhas de comunicação: SCK (*Serial Clock*), MOSI/SDI (*Master Output/ Slave Data In*), MISO/SDO (*Master Input/ Slave Data Out*) e SS (*Slave Select*), como indicado na Figura 10. Segundo Miyadara (2011), esta interface apresenta uma taxa de comunicação maior do que o I²C, devido ao fato dos dispositivos escravos não possuírem um endereço e sim serem selecionados por meio do pino SS, além da existência de dois canais de comunicação separados, podendo enviar e receber simultaneamente.

O início da comunicação entre dois dispositivos ocorre quando o mestre seleciona o escravo (na maioria dos casos, $\overline{SS} = 0$) que se deseja interagir, então o escravo se prepara para conversar (em alguns casos não é instantâneo). Ao mesmo tempo em que o mestre envia um dado para o escravo, ele também recebe. O final da comunicação ocorre quando o escravo é desabilitado ($\overline{SS} = 1$) (MIYADAIRA, 2011).

Figura 10. Protocolo de comunicação SPI



Fonte: MIYADAIRA (2011).

3.4 Comunicação serial

Comunicação serial é a transferência de dados bit a bit, usada para a comunicação entre o computador e outros dispositivos, em que, cada bit representa uma condição de tensão (0 ou 1) para envio ou recebimento de dados. Dentre as interfaces de comunicação serial, destacam-se a USART e a USB.

- **USART**

A USART (*Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter*), também conhecida como interface de comunicação serial, é um circuito eletrônico responsável pela interface entre o dispositivo e a porta serial. Uma aplicação muito comum desse módulo é a comunicação assíncrona RS-232 (MIYADAIRA, 2011).

O protocolo RS-232 é um padrão de comunicação serial criado para a comunicação entre um terminal de dados e um comunicador de dados, enviando pacotes de 10 ou 11 *bits*, dos quais, 8 *bits* constituem a mensagem, 1 *bit* de início, 1/1,5/2 *bit(s)* de parada e 1 *bit* de paridade, para controle do erro.

No PIC18F4550, os pinos 25 (RC6/TX/CK) e 26 (RC7/RX/DT) são dedicados para a comunicação assíncrona (TX e RX) e para o modo síncrono (CK e DT). Este protocolo pode ser acionado por meio do módulo EUSART do microcontrolador.

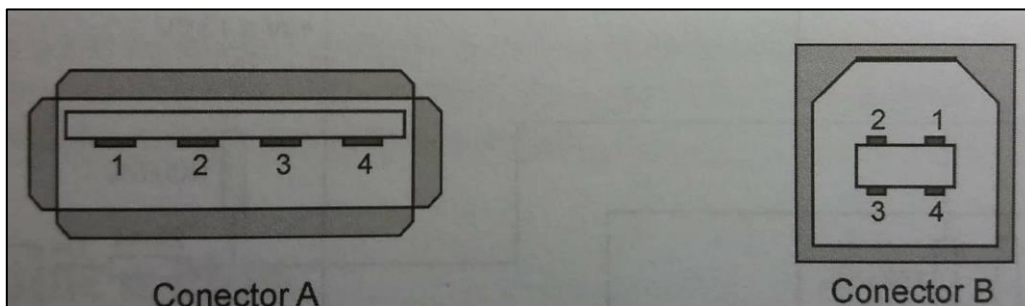
- **USB**

O USB (Barramento Serial Universal) é considerado um dos mais utilizados barramentos que possibilitam comunicação de alta velocidade entre periféricos e o PC (Computador Pessoal). Trata-se de uma comunicação assíncrona padronizada, que opera no modo *half-duplex*. (MIYADAIRA, 2011).

A comunicação USB, fundamentada no microcontrolador PIC18F4550, não requer fonte de alimentação externa, as linhas de conexões para os pinos são VCC e GND, disponíveis para alimentação de circuitos e os pinos D+ (RC5) e D- (RC4) utilizados para transmissão de dados. É necessário a utilização de um capacitor cerâmico no pino 18 (VUSB) ao GND.

Os conectores USB existentes são do tipo A e B, conforme a Figura 11, e os conectores mini. Os pinos enumerados de 1 a 4 representam VCC (5 V), D- (Data -), D+ (Data +) e GND (Ground) respectivamente.

Figura 11. Conectores USB dos tipos "A" e "B"



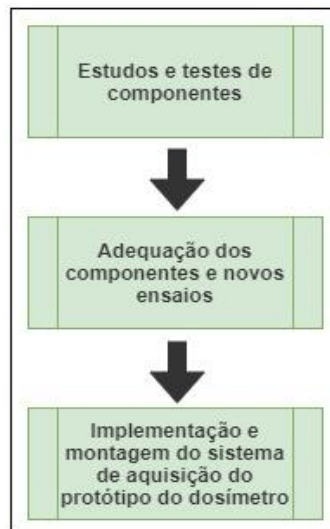
Fonte: MIYADAIRA (2011).

O PIC permite a utilização do protocolo de comunicação CDC, que emula uma porta COM virtual o que simplifica muito a programação da interface com o computador. Como características, esta interface apresenta uma máxima velocidade de 80 kb/s, o driver suporta o Windows 64bits e trabalha na versão USB 2.0.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O projeto do sistema de aquisição foi dividido em três etapas, consideradas como etapas para construção do protótipo, conforme a Figura 12: 1) Estudos e testes de componentes, 2) Adequação dos componentes e novos ensaios, 3) Implementação e montagem do sistema de aquisição do protótipo do dosímetro.

Figura 12. Etapas construção do protótipo do dosímetro.



Fonte: Autoria própria.

Para à execução do projeto, as rotinas seguidas foram: selecionar os componentes, microcontrolador e acelerômetro, definir o protocolo de comunicação e realizar testes. Quando os resultados fossem satisfatórios ocorreria a implementação e montagem para que um novo ensaio fosse realizado. Caso algum dos testes não fosse satisfatório, outros componentes seriam analisados.

Considerando que o sistema de aquisição é composto por um sensor acelerômetro e um microcontrolador interagindo por um protocolo de comunicação, por meio de estudos realizados, foram selecionados alguns dispositivos para a execução deste projeto. Dentre eles, consideraram-se os sensores acelerômetros ADXL345, KX122-1037 e BU-27135, os microcontroladores ATmega328 (embarcado no Arduino Nano V3.1) e PIC18F4550. Para o sistema de armazenamento, tem-se a possibilidade de utilizar o cartão de memória SD *card*, mas, para este projeto, a aquisição será

feita diretamente no computador e os dados armazenados por meio do Matlab, para análise do sinal. O diagrama da Figura 13 apresenta a disposição do sistema de aquisição planejado.

Figura 13. Diagrama do sistema de aquisição.



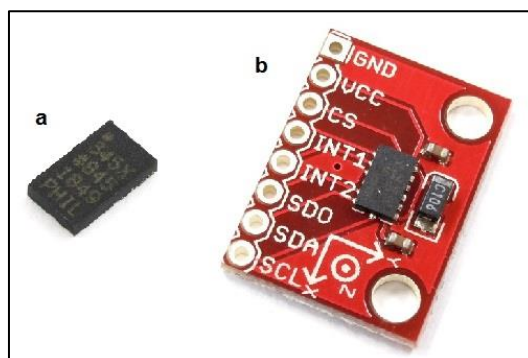
Fonte: Autoria própria.

4.1 Acelerômetros

- **ADXL345**

O sensor acelerômetro digital ADXL345, fabricado pela *Analog Devices*, disponível para medições de ângulos menores do que 1° , possui alta resolução (até 13-bit), a saída de dados é 16-bit, possibilita a leitura nos 3 eixos (X, Y e Z) com valores limites de aceleração relativa de $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$ e $\pm 16g$, sendo acessível para os protocolos de comunicação I²C e SPI. O sensor é limitado em uma taxa de saída de dados de até 3.200 Hz (*Analog Devices*, 2009). Sua configuração é fundamentada em registradores que podem ter seus valores alterados para ativar funções ou definir a frequência de operação. O ADXL345 possui um encapsulamento SMD, Figura 14a, com dimensões 3x5x1 mm, podendo ser encontrado em placas de circuitos impresso conforme a Figura 14b.

Figura 14. Acelerômetro digital ADXL345.



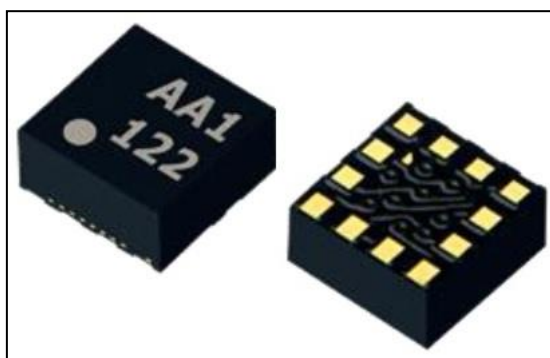
Fonte: Autoria própria.

O acelerômetro ADXL345, quando utilizado em protocolo I²C, opera com um *Clock* (CLK) de transferência de dados entre 100 kHz (padrão) e 400 kHz (modo rápido). Já em SPI opera com uma velocidade máxima de *clock* de 5 MHz (*Datasheet ADXL345, 2009*).

- **KX122-1037**

O sensor acelerômetro digital modelo KX122-1037, do fabricante *Kionix*, apresentado na Figura 15, possui resolução de 8 bits e 16 bits, três eixos de leituras de sinais (X, Y e Z), conforme a Figura 16, valores limites de aceleração relativa de: $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$. O sensor possui encapsulamento SMD e dimensões de 2 x 2 x 0.9 mm, acessível para os protocolos de comunicação serial síncrona (I²C e SPI) e tensão de operação de 1,8 a 3,6 VDC.

Figura 15. Acelerômetro KX122-1037.



Fonte: *Datasheet KX122-1037 (2016)*.

Figura 16. Saída e orientação da terra do acelerômetro KX122-1037.

| Static X/Y/Z Output Response versus Orientation to Earth's surface (1g): | | | | | | | | | | | | |
|--|-------|----|--------|-----|--------|-----|-------|----|---------------|----|---------------|-----|
| GSEL1=0, GSEL0=0 ($\pm 2g$) | | | | | | | | | | | | |
| Position | 1 | | 2 | | 3 | | 4 | | 5 | | 6 | |
| Diagram | | | | | | | | | Top Bottom | | Bottom Top | |
| Resolution (bits) | 16 | 8 | 16 | 8 | 16 | 8 | 16 | 8 | 16 | 8 | 16 | 8 |
| X (counts) | 16384 | 64 | 0 | 0 | -16384 | -64 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Y (counts) | 0 | 0 | -16384 | -64 | 0 | 0 | 16384 | 64 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Z (counts) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 16384 | 64 | -16384 | -64 |
| X-Polarity | + | | 0 | | - | | 0 | | 0 | | 0 | |
| Y-Polarity | 0 | | - | | 0 | | + | | 0 | | 0 | |
| Z-Polarity | 0 | | 0 | | 0 | | 0 | | + | | - | |
| ↓ (1g) | | | | | | | | | | | | |
| Earth's Surface | | | | | | | | | | | | |

Fonte: Adaptado de *Datasheet KIONIX (2016)*.

A taxa de saída de dados deste modelo varia de 12,5 Hz a 25,6 kHz, conforme a Tabela 1, retirada do manual do fabricante. O OSA representa os registradores responsáveis pela alteração do valor da taxa de saída de dados.

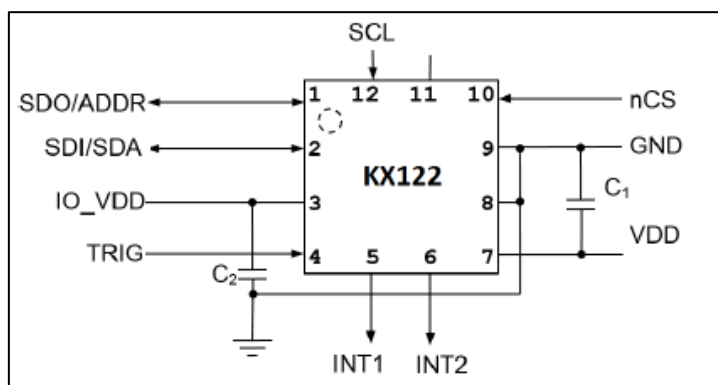
Tabela 1. Taxa de dados na saída do acelerômetro

| OSA3 | OSA2 | OSA1 | OSA0 | Output Data Rate |
|------|------|------|------|------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 12,5Hz |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 25Hz |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 50Hz |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 100Hz |
| 0 | 1 | 0 | 0 | 200Hz |
| 0 | 1 | 0 | 1 | 400Hz |
| 0 | 1 | 1 | 0 | 800Hz |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1600Hz |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0,781Hz |
| 1 | 0 | 0 | 1 | 1,563Hz |
| 1 | 0 | 1 | 0 | 3,125Hz |
| 1 | 0 | 1 | 1 | 6,25Hz |
| 1 | 1 | 0 | 0 | 3200Hz |
| 1 | 1 | 0 | 1 | 6400Hz |
| 1 | 1 | 1 | 0 | 12800Hz |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 25600Hz |

Fonte: Adaptado de *Datasheet KIONIX (2016)*.

O circuito que compreende a interface para a utilização do sensor acelerômetro KX122-1037 está apresentado na Figura 17, retirada do manual do fabricante. Os valores dos capacitores C1 e C2 e descrições dos pinos podem ser verificados na Figura 18.

Figura 17. Circuito de interface do KX122-1037.



Fonte: Adaptado de *Datasheet KIONIX (2016)*.

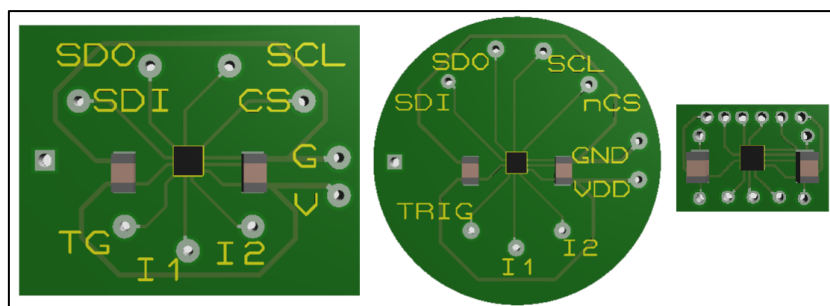
Figura 18. Descrições dos pinos do KX122-1037.

| Pin | Name | Description |
|-----|----------|--|
| 1 | SDO/ADDR | Serial Data Out pin during 4 wire SPI communication and part of the device address during I2C communication. |
| 2 | SDI/SDA | SPI Data input / I2C Serial Data |
| 3 | IO Vdd | The power supply input for the digital communication bus. Optionally decouple this pin to ground with a 0.1uF ceramic capacitor. |
| 4 | TRIG | Trigger pin for FIFO buffer control – Connect to GND when not using external trigger option |
| 5 | INT1 | Physical Interrupt 1 |
| 6 | INT2 | Physical Interrupt 2 |
| 7 | VDD | The power supply input. Decouple this pin to ground with a 0.1uF ceramic capacitor. |
| 8 | GND | Ground |
| 9 | GND | Ground |
| 10 | nCS | SPI enable / I2C mode select (0 = SPI enabled, I2C communication disabled / 1 = SPI disabled, I2C communication enabled) |
| 11 | NC | Not Internally Connected |
| 12 | SCLK/SCL | SPI and I ² C Serial Clock |

Fonte: Adaptado de *Datasheet KIONIX (2016)*.

Para a utilização desse acelerômetro, foram desenvolvidos três modelos de placas de circuito impresso, que variam de tamanho e formato, de acordo com a Figura 19. O maior modelo possui dimensão de 3 x 2,5 cm e o menor de 1,5 x 1 cm (podendo ser reduzido). Dentre os formatos, dois deles são retangulares e um circular, a versão final será projetada para o menor tamanho possível, visando o menor incômodo ao paciente.

Figura 19. Placas de interface KX122-1037 em vista 3D no software Proteus.



Fonte: Autoria própria.

- **BU-27135**

O sensor acelerômetro analógico modelo BU-27135, do fabricante *Knowles Electronics*, Figura 20, possui apenas um eixo de leitura de sinal (eixo Z), com valor limite de aceleração relativa de 1g. O sensor possui dimensões de 7,92 x 5,59 x 2,28 mm, com tensão de operação de 1,5V DC e corrente máxima de 0,3 mA. Sua faixa de frequência de leitura é de 20 Hz à 10 kHz (*DATASHEET BU-27135, 2006*). Para a utilização deste sensor se faz necessário um conversor analógico/digital para digitalizar o sinal captado.

Figura 20. Acelerômetro BU-27135



Fonte: *Mouser eletronic*s, <https://goo.gl/aqyGrL> (2016).

4.2 Microcontroladores

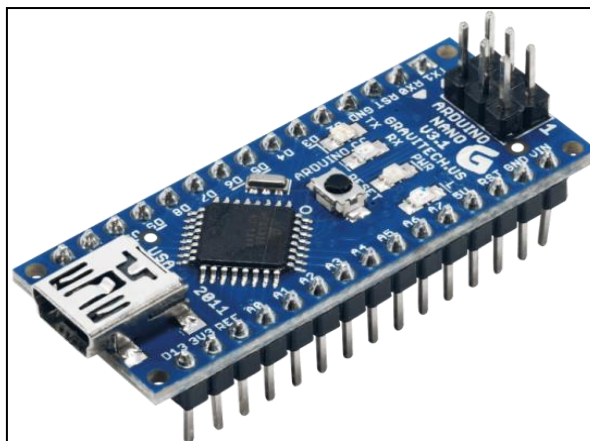
Neste projeto, foram selecionados dois microcontroladores que possuíam as especificações necessárias para testes. Pela disponibilidade em laboratório, por possuir tamanho reduzido e preço baixo no mercado, o ATmega328 da *Atmel* (Arduino Nano V3.x) foi a primeira opção para testes. Entretanto, levando em consideração um maior desempenho, selecionou-se o PIC18F4550 da *Microchip*, também por disponibilidade em laboratório e por possibilitar a comunicação USB.

- **Arduino Nano V3.1**

O Arduino é uma plataforma de prototipação eletrônica *open-source*. Uma placa composta por um microcontrolador da *Atmel*, com circuitos de entrada e saída facilmente acessíveis, de software e hardware bastante didáticos. O Arduino Nano 3.1 apresenta as mesmas características que outros modelos de interfaces Arduino, porém com um tamanho bem reduzido e trabalhando com um cabo USB Mini-B, conforme a Figura 21. O software para construir o programa tem uma interface simples e intuitiva.

Este dispositivo, com dimensões de 45 x 18 mm, possui um microcontrolador ATmega328 da *Atmel*, encapsulamento DIP28 e pode operar em até 20 MHz. Utiliza arquitetura *Harvard*, *RISC*, de 8 bits, 32 registradores e com portas para comunicação I²C e SPI (*DATASHEET ATMEGA328*, 2016).

Figura 21. Arduino Nano V3.1.



Fonte: ARDUINO, <https://goo.gl/ACpeCQ> (2016)

Os valores de *clock* (CLK) nos protocolos de comunicação I²C e SPI do Arduino podem assumir até 400 kHz e 8 MHz respectivamente, sendo o padrão 100 kHz e 4 MHz (DATASHEET ATMEGA328, 2016). As principais características do Arduino Nano V3.x estão descritas no Quadro 1.

Quadro 1. Características técnicas do Arduino Nano V3.x.

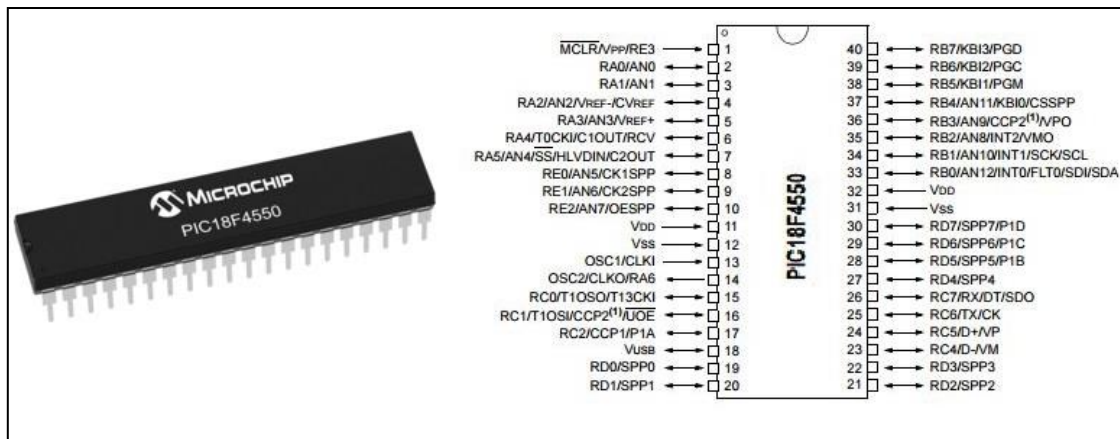
| | |
|---------------------------------|---|
| Tensão de operação | 5 V |
| Tensão de entrada (recomendada) | 7-12 V |
| Tensão de entrada (limites) | 6-20 V |
| Pinos digitais I/O | 14 pinos (6 com saídas PWM) |
| Pinos de entrada analógica | 8 |
| Corrente DC por pino I/O | 40 mA |
| Memória <i>Flash</i> | 32 kB (2 kB são usados pelo <i>bootloader</i>) |
| SRAM | 2 kB (ATmega328) |
| EEPROM | 1 kB (ATmega328) |
| Velocidade do <i>Clock</i> | 16 MHz |

Fonte: *Datasheet ATMEGA328* (2016).

- **PIC 18F4550**

O PIC18F4550 pertence à família de microcontroladores fabricado pela *MicroshipTechnology*. Com arquitetura *Harvard* e conjunto de instruções *RISC*, este apresenta uma alta *performance* computacional. Seus 40 pinos estão referenciados na Figura 22.

Figura 22. Microcontrolador PIC18F4550



Fonte: *Datasheet PIC18F4550 (2009)*.

O PIC18F4550 possui barramento de dados de 8 bits, barramento de instruções de 14 bits, com 75 ou 83 instruções. Outras características estão apresentadas no Quadro 2.

Quadro 2. Características do PIC18F4550

| | |
|------------------------------|-------------------------|
| Frequência de operação | 48 MHz |
| Memória de programa | 16384 instruções |
| Memória de dados | 2048 bytes |
| Pinos configuráveis como I/O | 35 |
| Portas de I/O | A, B, C, D, E |
| Comunicação Serial – SPI | 3 fios e 4 fios |
| Comunicação Serial – I2C | 2 vias |
| USB | Módulo USB 2.0 |
| Timers | 4 |
| Encapsulamento | PLCC, TQFP, DIP ou SOIC |

Fonte: *Datasheet PIC18F (2009)*.

As interfaces do protocolo de comunicação serial I²C e SPI do PIC18F4550 estão implementadas no módulo *Master Synchronous Serial Port* (MSSP), podendo ser ativa somente uma por vez. No PIC18F4550, cada protocolo possui diferentes características. Esta interface pode operar no modo *Master*, *Multi-Master* ou *Slave*. O valor que define a taxa de comunicação (*Baud rate*) do I²C, quando o PIC é configurado como *Master*, é armazenado no SSPADD (Registro de Endereço/*Baud Rate*). Os valores mais comuns de *baud rate* são 100 kHz, 400 kHz e 1 MHz. (*DATASHEET PIC18F, 2009*).

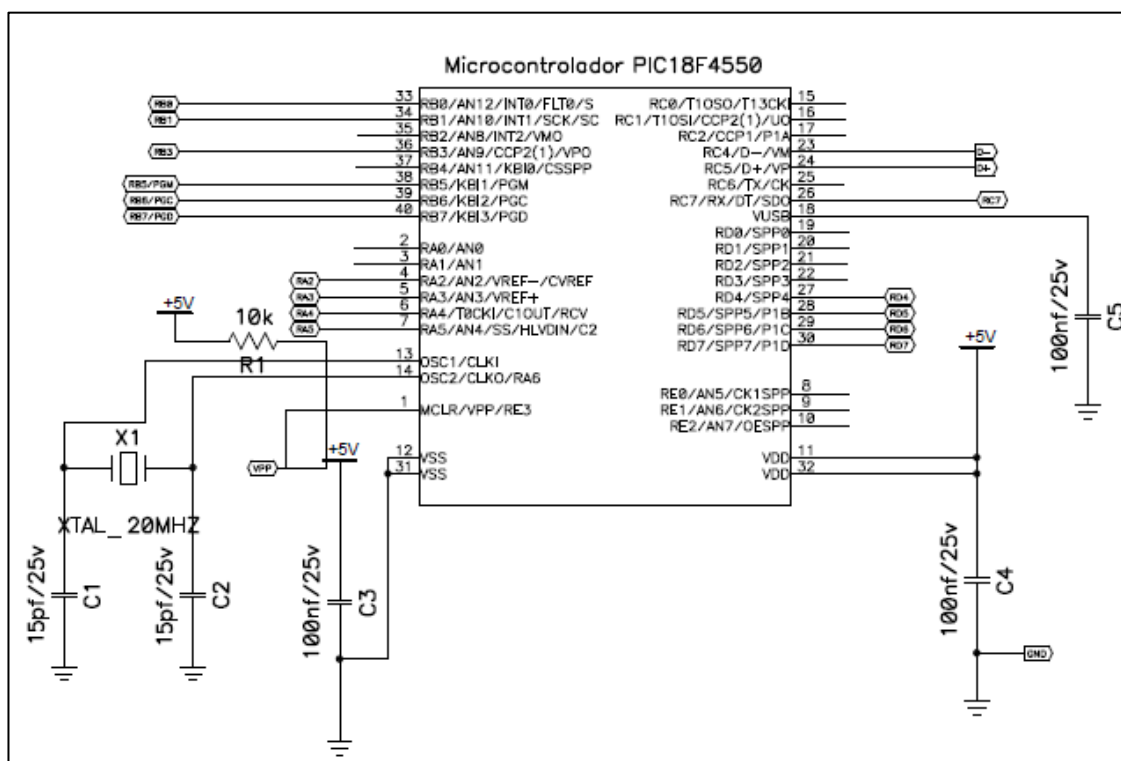
No protocolo SPI, o microcontrolador possui uma taxa de comunicação que pode atingir velocidade de 12 Mbps, com uma frequência de oscilador de 48 MHz (*DATASHEET PIC18F, 2009*).

4.3 Placa de desenvolvimento para o PIC18F4550

Para a utilização do PIC18F4550, foi desenvolvida uma placa de circuito impresso também com o apoio do LPROT do CIPECA.

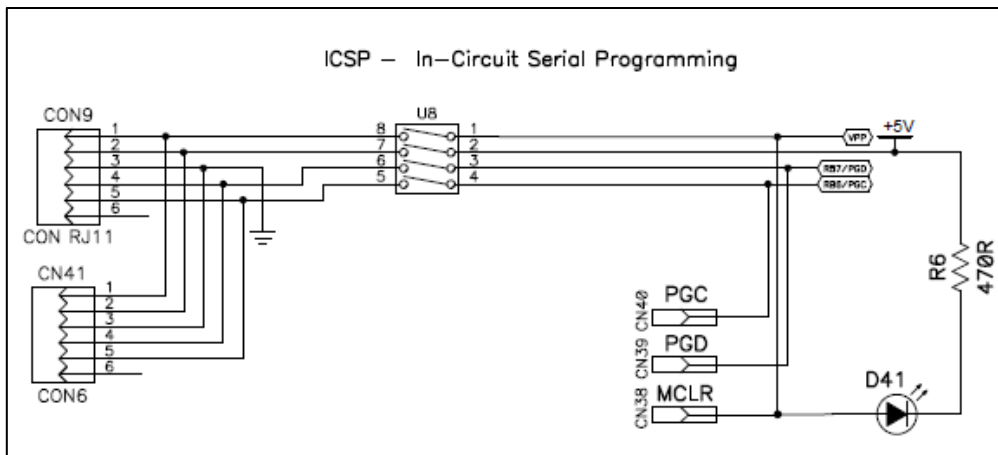
Dentre as funcionalidades desta placa do microcontrolador, Figura 23, destaca-se a possibilidade de gravação do PIC na própria placa, através do circuito ICSP (*In-Circuit Serial Programming*), Figura 24. A comunicação USB, que além de possibilitar a alimentação da placa, permite o recebimento e transferência de dados, de acordo com o circuito da Figura 25. Uma fonte reguladora de 5 V para 3,3 V, que permite a alimentação dos sensores utilizados, circuito apresentado na Figura 26, estão disponíveis na placa alguns *leds* responsáveis pela indicação do bom funcionamento da placa, circuito este denominado por circuito do *led* de supervisão na Figura 27.

Figura 23. Circuito Microcontrolador PIC18F4550



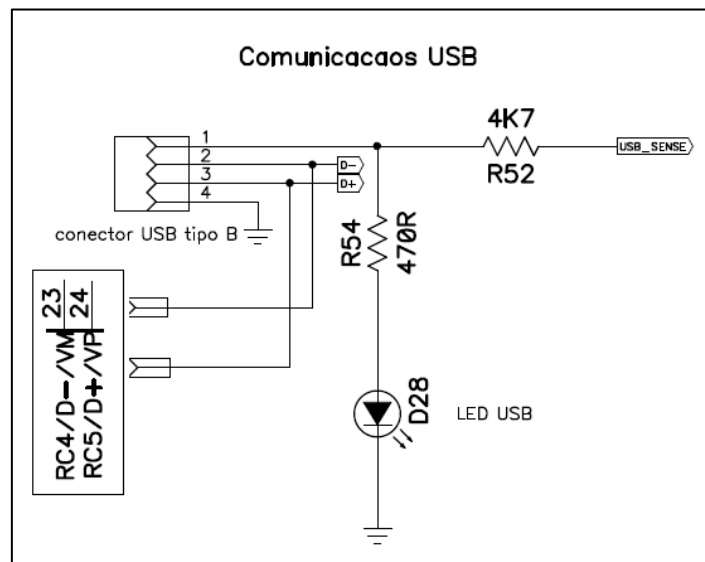
Fonte: Autoria própria.

Figura 24. Circuito de gravação do PIC.



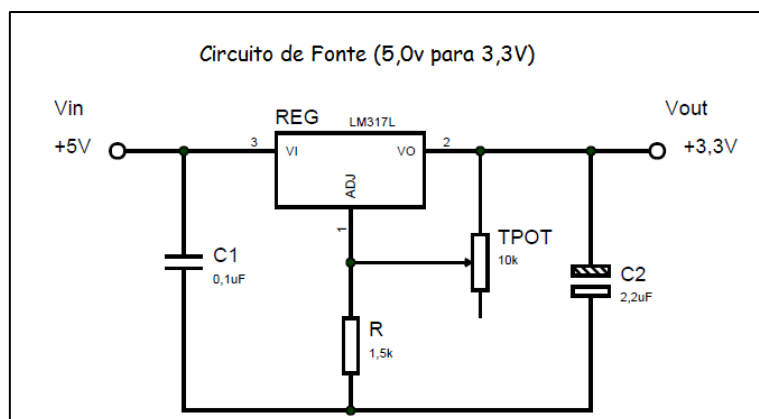
Fonte: Autoria própria.

Figura 25. Circuito de comunicação USB



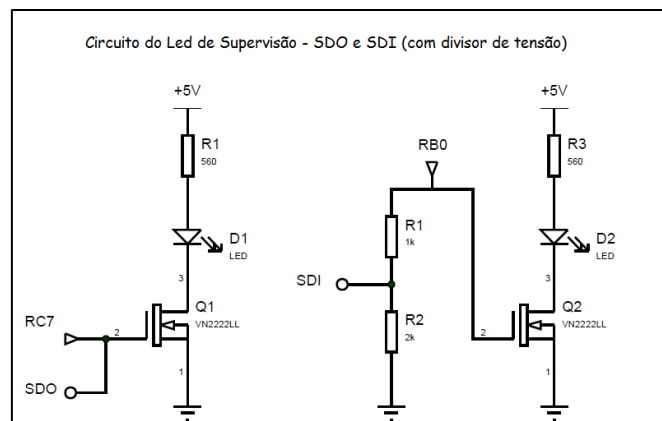
Fonte: Autoria própria.

Figura 26. Circuito de fonte para o sensor acelerômetro



Fonte: Autoria própria.

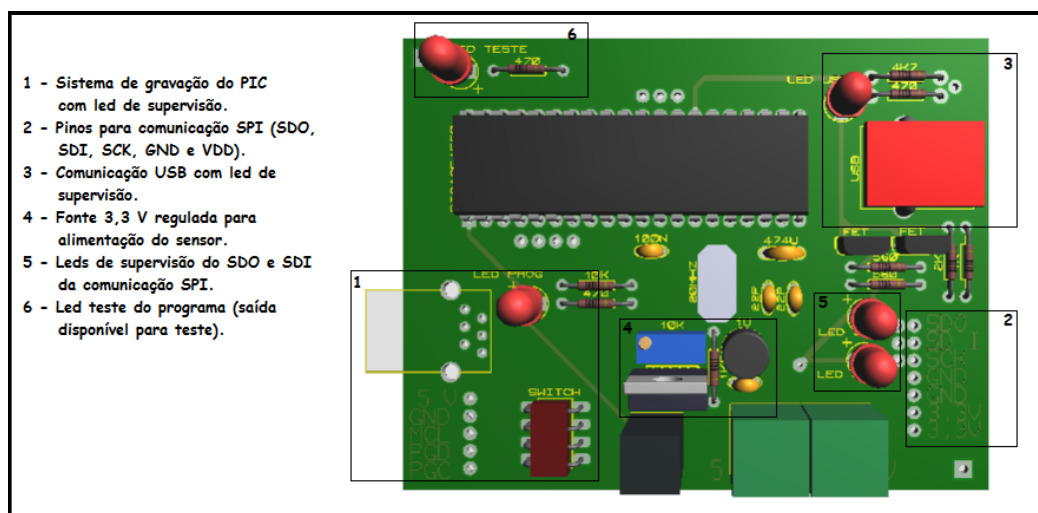
Figura 27. Circuito do led de supervisão



Fonte: Autoria própria.

A placa foi projetada no software *Proteus 8.0*, desenhada em *dual layers* com dimensões de 8,5 x 6,5 cm, considerando a melhor disposição dos componentes para possibilitar um manuseio ágil, conforme Figuras 28.

Figura 28. Placa de interface PIC em vista 3D no *Proteus*.



Fonte: Autoria própria.

Os pinos dedicados para a comunicação entre o sensor e o microcontrolador, com protocolo SPI são: SCL (pino 34), SDO (pino 26), SDI ou SDA (pino 33) que possui um divisor resistivo para baixar o sinal de 5 para 3,3 V, tensão máxima suportada pelo sensor, e o CS (pino 30). Para a comunicação USB, os pinos D+ (pino 24) e D- (pino 23) são utilizados e um capacitor de 470 nF deve ser colocado no pino 18 do PIC ao GND. Os pinos para gravação do PIC18F4550 são MCLR (VPP), VDD, VSS (GND), PGD, PGC e LVP, o gravador utilizado para a gravação do PIC foi o PICKit 3.

4.4 Metodologia para aquisição de sinais

No sistema de aquisição de sinais vibratórios das pregas vocais, o sensor acelerômetro está alongado por discretos fios e fixado no pescoço do indivíduo, abaixo da laringe, para conseguir coletar da melhor maneira as vibrações. Assim, o valor do sinal é lido pelo controlador por meio do protocolo de comunicação, sendo este processado e transmitido ao computador.

O primeiro fator que foi levado em consideração foi a amostragem necessária para que não houvesse perdas de informação devido ao *aliasing*. Esta condição acontece sempre que os sinais são amostrados a uma frequência que não obedece ao Critério de *Nyquist*, que define que a amostragem do sinal deve ser maior ou igual duas vezes a banda máxima do sinal (OPPENHEIM, 2013).

$$f_s \geq 2 * B \quad (2)$$

Onde f_s é a frequência de amostragem e B a banda máxima do sinal. Neste trabalho, considera-se como 4.000 Hz a largura da banda máxima do sinal de voz. Segundo Mehta et al (2013), a aquisição é eficiente com uma taxa de amostragem de 11.025 Hz, a qual também é usada neste projeto.

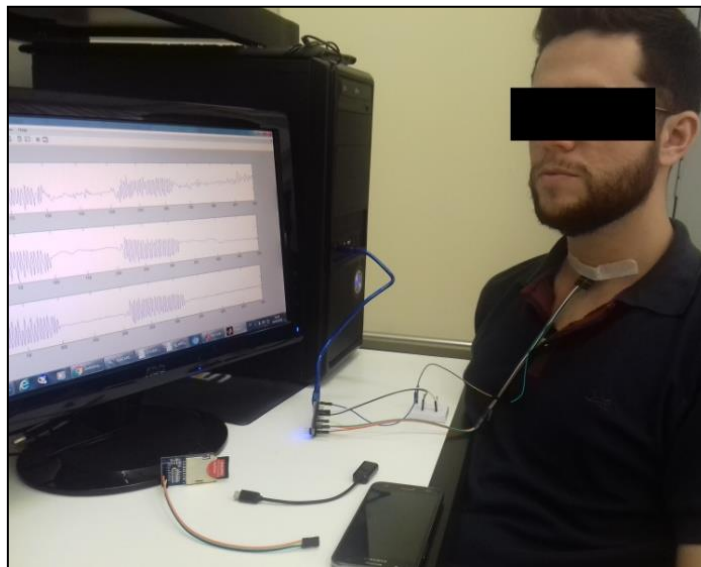
Considerando os sensores acelerômetros digitais relativos disponíveis para o protocolo de comunicação serial síncrono I²C e SPI, e os microcontroladores de diferentes capacidades de processamento, definiu-se o protocolo de comunicação a ser utilizado, considerando o qual possibilitaria alcançar a maior taxa de amostragem. O sensor acelerômetro deve ter seu valor relativo ajustado para o mínimo permitido (1g e 2g), por ser o valor de aceleração mais próximo para vibrações de pregas vocais (TITZE, 2000). Para o acelerômetro analógico, BU-27135, utilizado por Mehta et al (2013), devido à indisponibilidade do componente em laboratório e seu alto custo, fica apenas registrado sua capacidade para futuros projetos.

Na realização da primeira etapa do projeto, foi considerada a plataforma Arduino em conjunto com o sensor ADXL345, para a definição do protocolo de comunicação a ser utilizado. Em seguida, considerou-se o PIC18F4550 em conjunto com o ADXL345 e então o PIC18F4550 em conjunto com o acelerômetro KX122-1037.

5 RESULTADOS

Os testes de comunicação e análises da taxa de amostragem para todas as combinações de microcontroladores e sensores foram realizados nos sinais aquisitados com o acelerômetro fixado no pescoço de um voluntário conforme a Figura 29, e solicitado para emitir a vogal /a/ sustentada, intercalando momentos de silêncio por um breve período de tempo.

Figura 29. Teste de aquisição de sinais vibratórios.



Fonte: Autoria própria.

Para todos os testes, considerou-se o acelerômetro ajustado para o menor valor de sensibilidade possível, e a coleta dos dados foi realizada considerando os três eixos de leitura dos sensores, buscando sempre alcançar a taxa de amostragem máxima declarada pelo fabricante ou a taxa desejada para o projeto.

5.1 Arduino Nano e sensor acelerômetro ADXL345

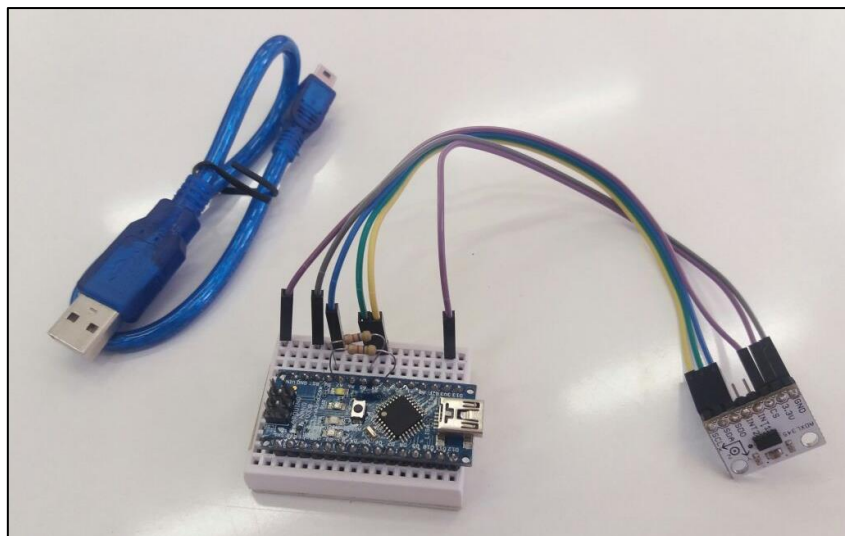
Alguns testes foram realizados utilizando o Arduino Nano e o sensor acelerômetro ADXL345, com o protocolo de comunicação I²C, declarado pelo registrador 0x53 do ADXL345, sensibilidade ajustada em 2g, pelo registrador 0x31 (*Data format control*), na resolução de 10 bits. Dessa forma, obteve-se o

primeiro contato com o sinal de vibração das pregas vocais e a avaliação do desempenho do microcontrolador, sensor e do protocolo de comunicação.

Outros registradores do acelerômetro importantes e que devem ser ativados são 0x2D (*Power control register*) onde deve-se habilitar o modo de medição e os registradores 0x32, 0x33, 0x34, 0x35, 0x36 e 0x37 (*Data XYZ*) que representam respectivamente os dois valores de leitura dos eixos X, Y e Z., sendo o primeiro, para o *byte* menos significativo (LSB) e segundo para o mais significativo (MSB). O ADXL345 oferece valores de aceleração de 10 bits, mas eles são armazenados como bytes (8 bits). Para obter o valor total, dois bytes devem ser combinados para cada eixo (X0 X1, Y0 Y1 e Z0 Z1).

Com este protocolo, resistores de *pull-up* de 4,7 kOhm foram conectados nos pinos SCL e SDA, e o sensor foi alimentado com 3,3 V, de acordo com a Figura 30.

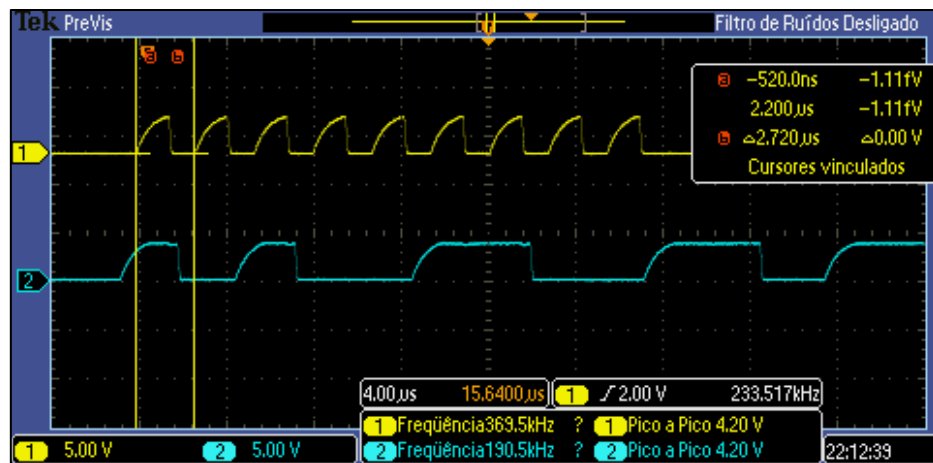
Figura 30. Arduino Nano e sensor acelerômetro ADXL345.



Fonte: Autoria própria.

Na programação do Arduino, utilizou-se a biblioteca *Wire.h*, a qual define o protocolo de comunicação e possibilita ajustar o valor da frequência de *clock* para 100 e 400 kHz. Nesta configuração, para a coleta de resultados, o *clock* disponibilizado pelo microcontrolador foi de 400 kHz, conforme a Figura 31. O canal 1 (amarelo) do osciloscópio indica o valor exato do sinal do clock e o canal 2 (azul) apresenta a dinâmica dos dados medidos no pino SDA.

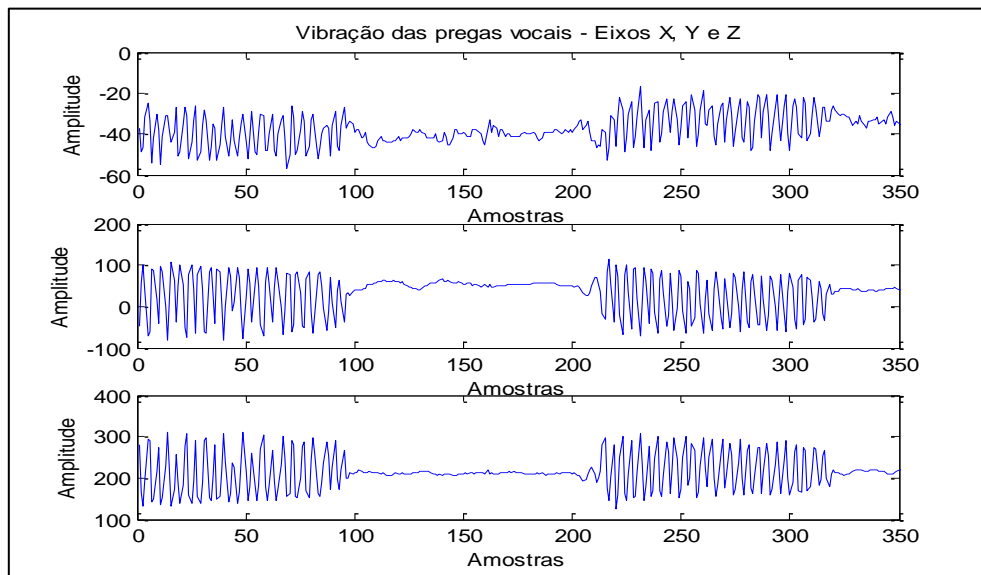
Figura 31. Sinais de SCL e SDA utilizando o Arduino e ADXL345 em I2C.



Fonte: Autoria própria.

Analisando o formato do pulso de *clock*, pela deformação mesmo em baixa frequência, pode-se perceber a ineficiência da aquisição utilizando este protocolo de comunicação. Este sinal resultou em uma taxa de amostragem de aproximadamente 100 Hz (calculado a partir do número de amostras e tempo de coleta), ou seja, com amostras por segundo e a vibração presente nos três eixos do acelerômetro são apresentados na Figura 32.

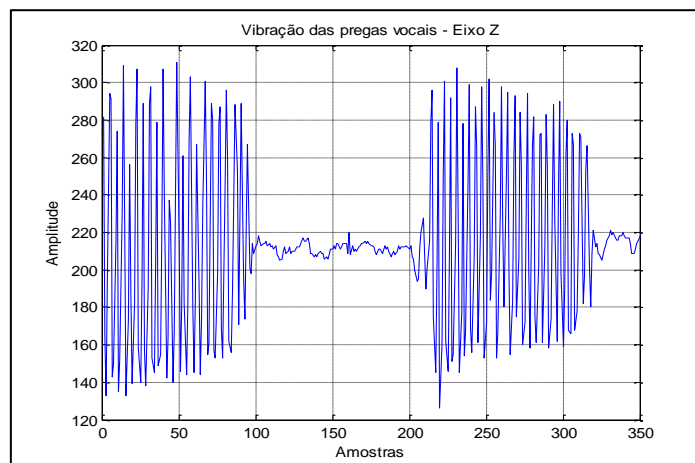
Figura 32. Dados coletados com o acelerômetro ADXL345 nos eixos X, Y e Z.



Fonte: Autoria Própria.

O eixo Z é o principal para coleta neste estudo. Devido ao posicionamento do sensor, este recebe vibração perpendicular à variação da pele do pescoço, Figura 33.

Figura 33. Sinal de dados do ADXL345, eixo Z. (I²C)

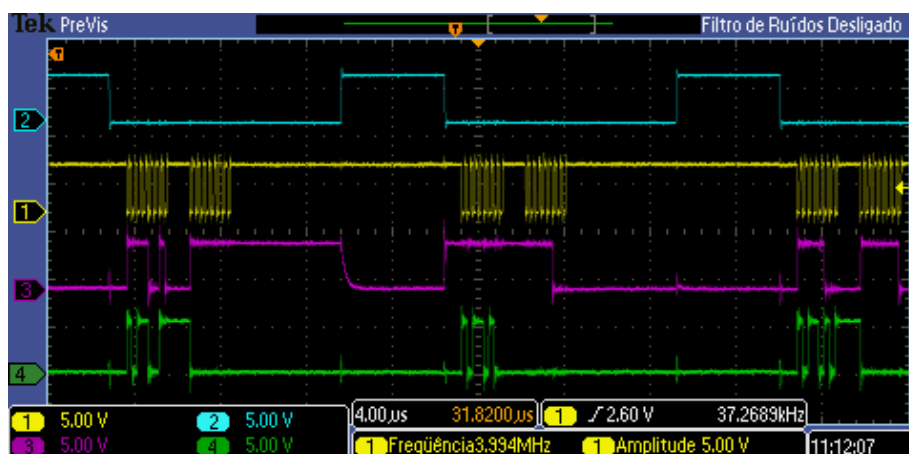


Fonte: Autoria própria.

Em seguida, utilizando os mesmos componentes, mas a fim de se obter uma maior taxa de amostragem, uma nova programação foi construída utilizando o protocolo de comunicação SPI, a partir da biblioteca SPI.h.

Os sinais de vibração das pregas vocais do voluntário foram coletados em ligação SPI 4 fios, definido no registrador DATA_FORMAT 0x31 (*bit* D6 em nível lógico zero), utilizando os pinos SCL, SDI, SDO e CS, mantendo o acelerômetro nas mesmas configurações e o Arduino com um *clock* de 4 MHz, o mais próximo do máximo permitido pelo acelerômetro, ajustado por meio da função “*SPI.setClockDivider(x);*” onde *x* pode assumir valores de 2, 4, 8, 16, 32 e 64. O valor real do *clock* pode ser visto na Figura 34 no canal 1 (amarelo), bem como a dinâmica presente no protocolo SPI, como CS (azul), SDI (rosa) e SDO (verde).

Figura 34. Sinais de CS, SCL, SDO e SDI utilizando o Arduino e ADXL345 em SPI.

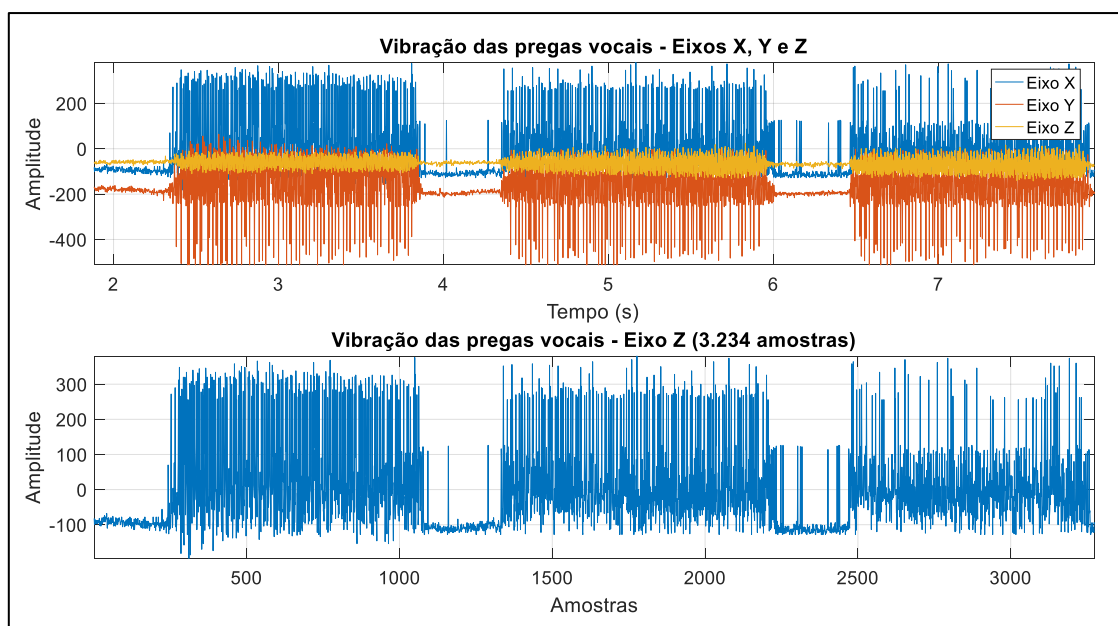


Fonte: Autoria própria.

Analisando o funcionamento deste protocolo, temos o canal 2 (azul) que representa o sinal CS, que na programação permite a comunicação quando está em nível lógico baixo, assim o sinal de *clock*, canal 1 (amarelo), no pino SCL é liberado possibilitando a comunicação e nos canais 3 (roxo) e 4 (verde), tem-se a dinâmica dos pinos SDO e SDI respectivamente.

Nesta programação, além dos registradores 0x2D, 0x31, 0x2C e 0x32 ao 0x37, o 0x2C (*Data rate and power mode control*) também é ativado, para declarar operação na taxa de saída máxima permitida pelo sensor. O sinal adquirido diretamente no Matlab (por meios da leitura da porta serial) resultou em uma taxa de amostragem de 1.600 Hz. Em cada amostra coletada, em X, Y e Z, o programa apresentava o tempo (t) gasto para a realização das medidas, resultando em uma matriz do tipo [X Y Z t]. Os gráficos estão apresentados nas Figura 35 e 36.

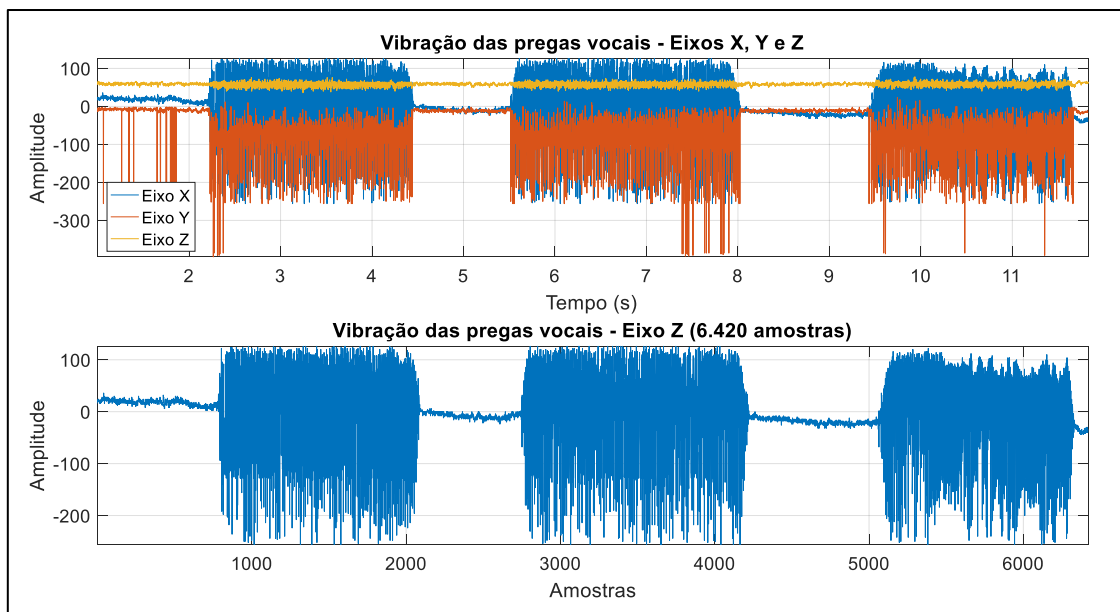
Figura 35. Dados coletados com o ADXL345 e o Arduino, em SPI.



Fonte: Autoria própria.

A comprovação da taxa de amostragem, pode ser verificada considerando o número total de amostras em cada eixo, 3.234 (gráfico 2 da Figura 35), dividido pelo tempo (em segundos) gasto para a aquisição, neste caso 6,1 s (gráfico 2), operação esta que resulta no valor de aproximadamente 530 Hz por eixo. Como cada coleta acontece nos três eixos simultâneos, basta multiplicar este valor por três, referente aos eixos X, Y e Z.

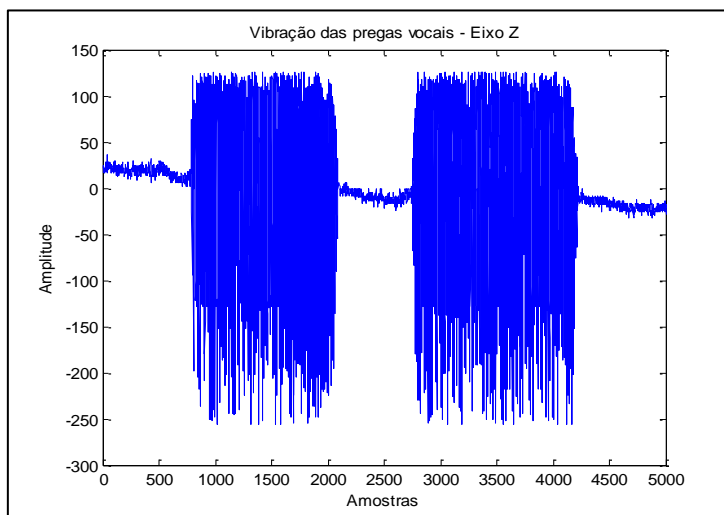
Figura 36. Dados coletados com o ADXL345 e o Arduino, em SPI.



Fonte: Autoria própria.

Para este segundo caso da Figura 36, encontra-se o valor de 1.600 Hz de taxa de saída de dados, considerando 6.420 amostras em 12s. O eixo Z deste sinal está apresentado na Figura 37, onde permite a comparação do número de pontos em relação ao sinal adquirido com o protocolo I²C.

Figura 37. Sinal de dados do ADXL345, eixo Z. (SPI)

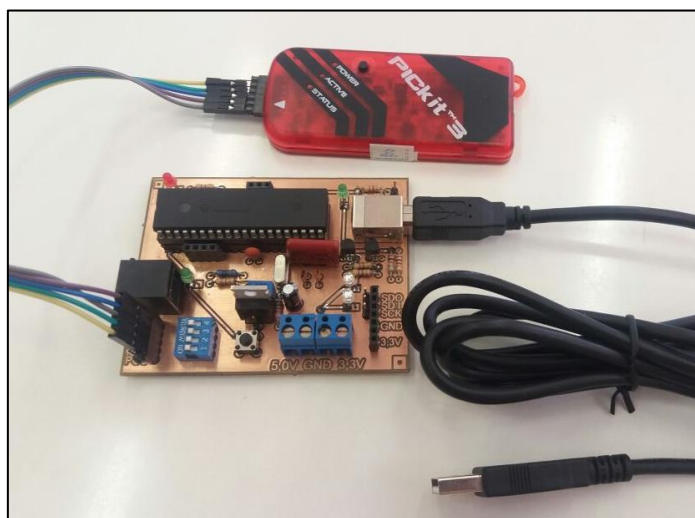


Fonte: Autoria própria.

5.2 PIC18F4550 e sensor acelerômetro ADXL345

Com o apoio do Laboratório de Prototipagem (LPROT) do Centro Integrado em Pesquisa de Controle e Automação (CIPECA) da UTFPR, a placa para a utilização do PIC18F4550 foi prototipada e está apresentada na Figura 38, juntamente com o gravador utilizado para a gravação do PIC.

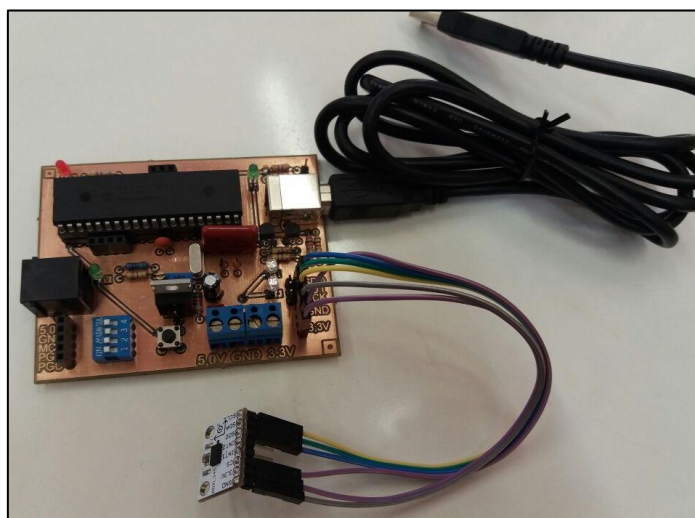
Figura 38. Placa de interface do PIC e gravador PICKit3



Fonte: Autoria própria.

Alguns testes foram realizados utilizando o PIC18F4550 e sensor acelerômetro ADXL345, Figura 39, em protocolo de comunicação SPI com o acelerômetro ajustado em 2g e resolução de 10 bits (*full resolution*).

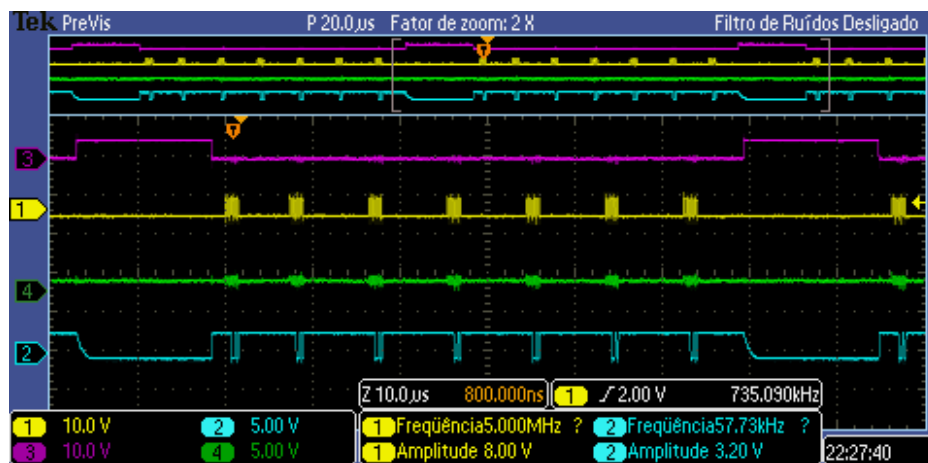
Figura 39. PIC 18F4550 com ADXL345 em protocolo SPI.



Fonte: Autoria própria.

Nesta ligação, os pinos CS, SCL, SDI e SDO do acelerômetro estão conectados respectivamente com os pinos 30, 34, 33 e 26 do microcontrolador. A placa com o oscilador de 20 MHz, no SPI 4 fios, permitiu um *clock* de 5 MHz (*clock/4*), canal 1 (amarelo) do osciloscópio, o que possibilita a utilização do sensor em sua taxa de saída máxima. O canal 3 (roxo) refere-se ao CS, o canal 2 (azul) ao SDO e o canal 4 (verde) ao SDI, conforme apresentado na Figura 40.

Figura 40. Sinais de CS, SCL, SDO e SDI utilizando o PIC18F4550 e ADXL345.



Fonte: Autoria própria.

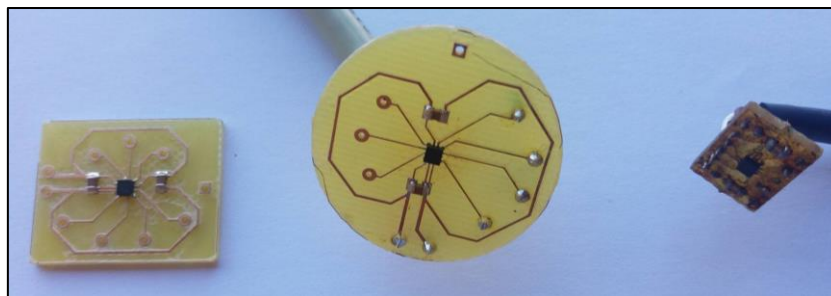
A realização deste teste, tinha como objetivo possibilitar a análise da qualidade do sinal de vibração, que seria coletado também em taxa máxima, afim de comparar os microcontroladores, Arduino e PIC, quanto a influência de suas capacidades de processamento com relação a este propósito. Porém, a aquisição do sinal não se tornou possível devido a problemas encontrados com a comunicação serial (USB e UART) e interferências na plataforma prototipada.

Durante todo o prazo de construção deste projeto, três placas foram construídas buscando sempre a correção de alguns problemas físicos e até esta versão, tal problema ainda persiste.

5.3 PIC18F4550 e sensor acelerômetro KX122-1037

Para a utilização acelerômetro KX122-1037, foram desenvolvidas, com apoio do LPROT, as três placas de circuito impresso apresentadas na Figura 41.

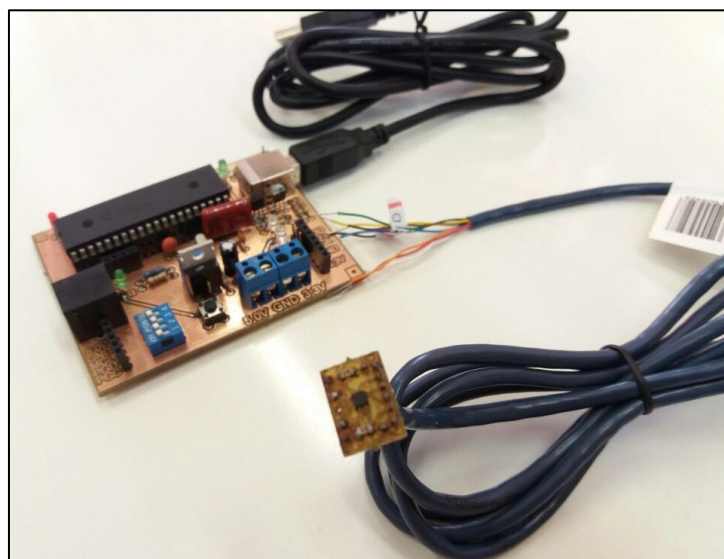
Figura 41. Placas acelerômetro KX122-1037.



Fonte: Autoria própria.

Como teste final, seriam considerados o PIC18F4550 com o sensor KX122-1037, apresentados na Figura 42, também em SPI, que seria a combinação mais promissora devido à capacidade de processamento e desempenho do acelerômetro, frequências de até 25 kHz com um *clock* de 10 MHz.

Figura 42. PIC 18F4550 com KX122-1037 em protocolo SPI



Fonte: Autoria própria.

6 CONCLUSÃO

Devido à necessidade da análise de uma amostra de vibrações das pregas vocais de 12 horas de duração, para um diagnóstico preciso de prevenção a distúrbios da voz, foi iniciado esse projeto de pesquisa. O intuito dos estudos preliminares foi conhecer as características dos sinais a serem trabalhados e selecionar os equipamentos necessários para o desenvolvimento do protótipo do sistema de aquisição do dosímetro.

Com a definição dos equipamentos a serem utilizados, estes foram separados em três conjuntos para testes. Nos primeiros testes, utilizou-se o Arduino Nano (ATmega328) e o acelerômetro ADXL345, com os protocolos I²C e SPI, sendo os resultados determinantes para a definição do protocolo de comunicação a ser utilizado no trabalho. Utilizando o I²C percebeu-se a limitação na velocidade de comunicação, com o SPI, pode-se atingir uma taxa de amostragem de dados de 1.600 Hz. Nenhum valor acima deste foi alcançado, devido as limitações de processamento e memória do microcontrolador Arduino.

Mesmo conhecendo a ineficiência do sensor ADXL345, por meio de estudos do *datasheet*, para operar na taxa de amostragem necessária para o projeto, mas devido a indisponibilidade na época, de outro sensor acelerômetro, o segundo conjunto de equipamentos selecionados para testes consistiam no microcontrolador PIC18F4550, por meio da interface construída para o projeto, e do acelerômetro ADXL345, utilizando o protocolo de comunicação SPI. Apesar da verificação dos sinais nos pinos de comunicação por meio do osciloscópio, não foi possível a aquisição do sinal de vibração devido a problemas com a comunicação serial e interferências na plataforma prototipada.

Por último, seria considerado a combinação do PIC18F4550 com o sensor acelerômetro Kionix, KX122-1037, que teve sua interface também prototipada neste projeto. Esta combinação demonstra-se promissora para resolução do problema da taxa de amostragem necessária para a aquisição deste sinal. Ficando para próximos estudos, a prototipagem das interfaces em locais especializados.

REFERÊNCIAS

ALVES, L. P., ARAÚJO, L.T.R., XAVIER NETO, J.A. **Prevalência de queixas vocais e estudo de fatores associados em uma amostra de professores de ensino fundamental em Maceió, Alagoas, Brasil.** Rev Bras Saúde Ocup. 2010; 35:168-75.

ANALOG DEVICES. **Digital Accelerometer ADXL345.** 2009. 40 p.

ATMEL. ATmega328/P Datasheet Complete. 2016.

BEHLAU, M. **A voz que ensina: o professor e a comunicação oral em sala de aula.** REVINTER, Rio de Janeiro, 2004.

BEHLAU, M. **Voz: O Livro do Especialista.** REVINTER, Vol. 1, 2001.

CATANI, G. S. A., CARVALHO, B. **Proposed computerized protocol for epidemiological study of patients under going microsurgery of the larynx.** International Archives of Otorhinolaryngology, v. 16, n. 3, p. 346–352, 2013.

CATANI, G. S. A. **Estudo da percepção vocal e análise acústica pré e pós-operatória em pacientes profissionais da voz submetidos à microcirurgia de laringe.** Tese de Doutorado. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 21 f., 2015.

DAJER, M. E. **Análise de sinais de voz por padrões visuais de dinâmica vocal.** Universidade de São Paulo, São Carlos, 154 p, 2010.

EXSTO Tecnologia. **XM118 – Microcontroladores PIC18 – Teoria, Caderno de Experiência e Manual.** Santa Rita do Spucaí, O vale da Eletrônica, 2009.

FERRACCIU C. C. S. e ALMEIDA M. S. **O distúrbio de voz relacionado ao trabalho do professor e a legislação atual.** Revista CEFAC, 2014.

GAMA, A. C. C., SANTOS. N J. *et al.* **Dose vocal em professores: correlação com a presença de disfonia.** Universidade Federal de Minas Gerais. CoDAS 28(2):190-192, Belo Horizonte, 2016.

GILLIVAN-MURPHY, P. *et al.* **The effectiveness of a voice treatment approach for teachers with self-reported voice problems.** Journal of voice, v. 20, n. 3, p. 423–431, 2006.

IRIYA, R. **Análise de sinais de voz para reconhecimento de emoções.** Dissertação de mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2014.

KTH, **School of Computer Science and Communication.** Disponível em: <<https://goo.gl/u2XRU3>>. Acesso em 10 set. 2016.

KIONIX. **Digital Accelerometer Specifications, Rev. 5**. Ithaca, NY, 2016. 81 p.

KNOWLES ELECTRONICS. **Vibration Transducer Performance Specification BU-27135-000**. Itasca: Illinois, 2006. 2p.

METHA, D. D., ZAÑARTU, M., VAN STAN, J. H., FENG, S. W., CHEYNE, H. A., HILLMAN, R. E. **Smartphone based detection of voice disorders by long-term monitoring of neck acceleration features**. *IEEE International Conference on Body Sensor Networks*, 2013.

MICROCHIP TECHNOLOGY. **PIC18F2455/2550/4455/4550 Data Sheet**. 2009. 438p.

MIYADAIRA, A. N. **Microcontroladores Pic18: aprenda e programe em Linguagem C**. 2 ed. São Paulo: Érica, 2011.

NEMR, N. K., SIMÕES-ZENARI, M., FERREIRA, T.S., FERNANDES, H.R., MANSUR, L.L. **Disfonia como principal queixa num quadro de miastenia grave: diagnóstico e fonoterapia**. *CoDAS* 2013;25(3):297-300

ONOFRE, T. B. **Desenvolvimento de um Protocolo de Comunicação Bidirecional em VHDL para Eletrodos Digitais de EEG**. Dissertação de Mestrado UNIFEI, Itajubá: 2014

OPPENHEIM, A. V.; SCHAFFER, R. W. **Processamento em tempo discreto de sinais**, Pearson, 3ª edição. 2013.

PAPOLO, P.S., HUNTER, E. J., *et al.* **Teachers' Guide to Voice Dosimetry**. The National Center for Voice and Speech Online Technical Memo, No 4, 2004.

PAPOLO, P.S., TITZE I, R., *et al.* **Technical Considerations in the Design of a Wearable Voice Dosimeter**. The National Center for Voice and Speech Online Technical Memo, No 5, 2005.

PATROCÍNIO M.P., MORETI F., RAIZE T., SAUDA C., LOURENÇO L., OLIVEIRA G., BEHLAU M. **Grau de quantidade de fala e intensidade vocal de teleoperadores em ambiente laboral e extralaboral**. *Revista da Sociedade Brasileira de Fonoaudiologia*. 385-390, 2013.

PRZYSIEZNY, Paulo Eduardo; PRZYSIEZNY, Luciana Tironi Sanson. **Distúrbio de voz relacionado ao trabalho**. *Braz. j. otorrinolaryngol.*, São Paulo , v. 81, n. 2, p. 202-211, Apr. 2015.

SANTOS, L. de S. L. **Sistema de comunicação USB com microcontrolador**. Monografia. Recife, 2009

TEVES, A. da C., **Otimização de acelerômetro MEMS eletroestáticos de alto desempenho**. Universidade de São Paulo, São Paulo, 128 p, 2013.

TITZE, I. R. ***Principles of Voice Production***. IA: National Center for Voice and Speech. Iowa City, 2000.

TORTORA, G. J., GRABOWSKI, S. R. **Princípios de Anatomia e Fisiologia**. Guanabara Koogan, Rio de Janeiro, 9a ed, 2002.

ZAMBON, F., BEHLAU, M., *et al.* **Epidemiology of Voice Disorders in Teachers and Nonteachers in Brazil: Prevalence and Adverse Effects**. *Journal of Voice*, Vol. 26, No. 5, 2012.