



Sistema embarcado portátil para a aquisição de áudio ultrassônico em roedores

Levy G. S. Galvão

Orientador:

Prof. Dr. Antônio W. A. Soares
DEE - UFRN

27 de julho de 2022

Sumário

- 1 Introdução
- 2 Desenvolvimento do sistema de aquisição
 - Requisitos
 - Arquitetura
 - Protótipos
- 3 Resultados
- 4 Conclusões

Sumário

1 Introdução

2 Desenvolvimento do sistema de aquisição

Requisitos
Arquitetura
Protótipos

3 Resultados

4 Conclusões

Introdução

Motivação:

- Importância das vocalizações;
- Alguns animais emitem vocalizações ultrassônicas (USVs), e.g. roedores;

Objetivos:

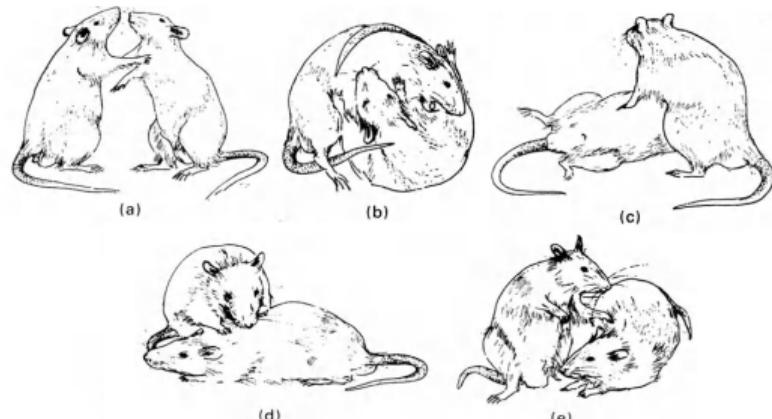
■ Objetivo geral:

- ▶ Registro de USVs;

■ Objetivos específicos:

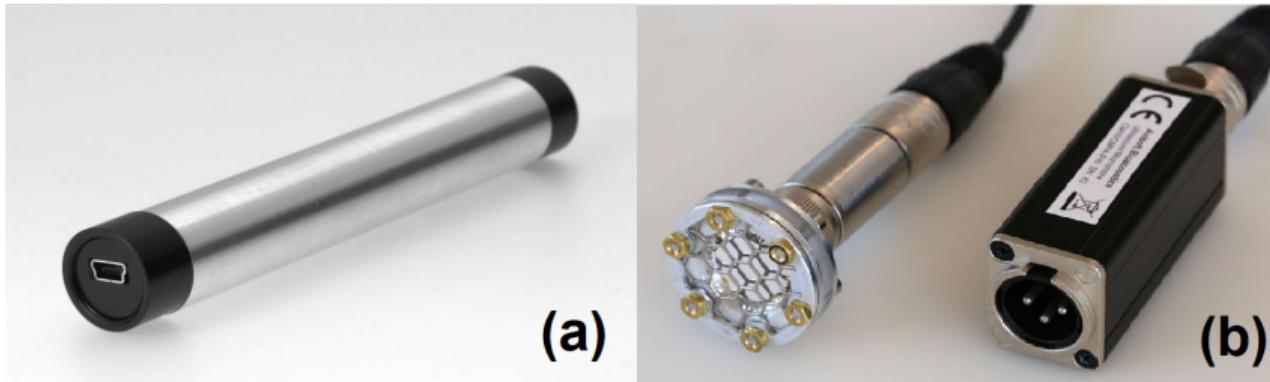
- ▶ Escolha de um microfone adequado;
- ▶ Estabelecer interface adequada entre microfone e controlador;
- ▶ Armazenamento local em tempo real;
- ▶ Protótipo compacto e portátil ($2 \times 2\text{cm}^2$);
- ▶ Validação do protótipo;

Figura: Encontro agressivo de ratos machos. (a) Boxe. (b) Luta livre. (c) Postura agressiva e submissa. (d) Agachado-submisso e noivo-agressivo. (e) Submisso-ereto e ameaçadora de lado.
Fonte: [Sales, 1974].



Soluções amplamente utilizadas

Figura: Sistemas de aquisição amplamente utilizados, com o microfone de captura e gravação (a) Ultramic 250K (U\$240, 130mm de comprimento e 20mm de diâmetro) [Dodotronic, 2020] e (b) o microfone condensador Avisoft-Bioacoustics CM16/CMPA (U\$2400, 36 × 36 × 60mm³) [AvisoftBioacustics, 2020].



Soluções alternativas

Figura: Sistemas alternativos de aquisição de áudio ambiental: (a) SOLO (>U\$35, $65 \times 56 \times 12\text{mm}^3$, para o Raspberry Pi A+) [Whytock, 2017], (b) Aurita (>U\$30, $350 \times 230 \times 86\text{mm}^3$, com base na caixa) [Beason, 2019], (c) BatPi (>U\$30, $85.6 \times 56.5 \times 17\text{mm}^3$, para o Raspberry Pi 3 B+) [Achen, 2017] e (d) AudioMoth (>U\$99, $58 \times 48 \times 17\text{mm}^3$) [Hill, 2019].



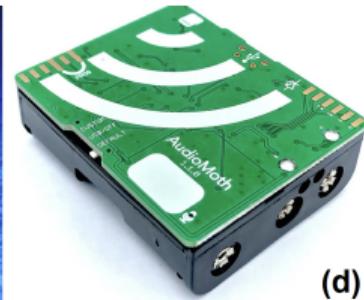
(a)



(b)



(c)



(d)

Sumário

1 Introdução

2 Desenvolvimento do sistema de aquisição

Requisitos

Arquitetura

Protótipos

3 Resultados

4 Conclusões

Sumário

1 Introdução

2 Desenvolvimento do sistema de aquisição

Requisitos

Arquitetura

Protótipos

3 Resultados

4 Conclusões

Características das USVs de roedores

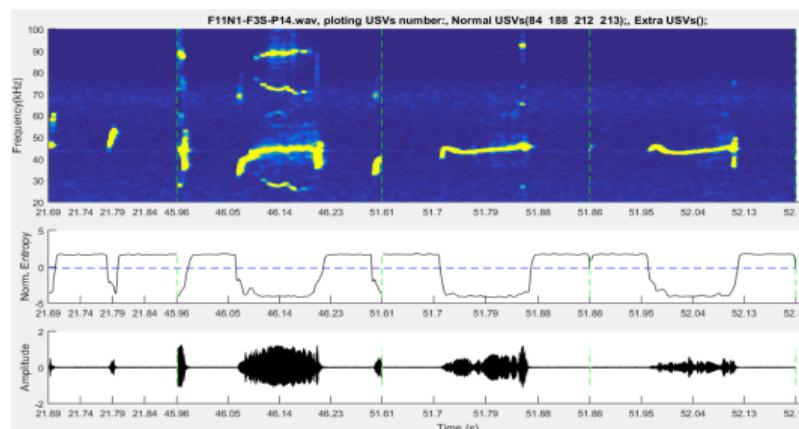
■ Características físicas:

- Faixa de frequência: 20 – 100 kHz; [Brudzynski, 2018]
- Nível de pressão sonora: 60 – 100 dB SPL; [Branchi, 2001]

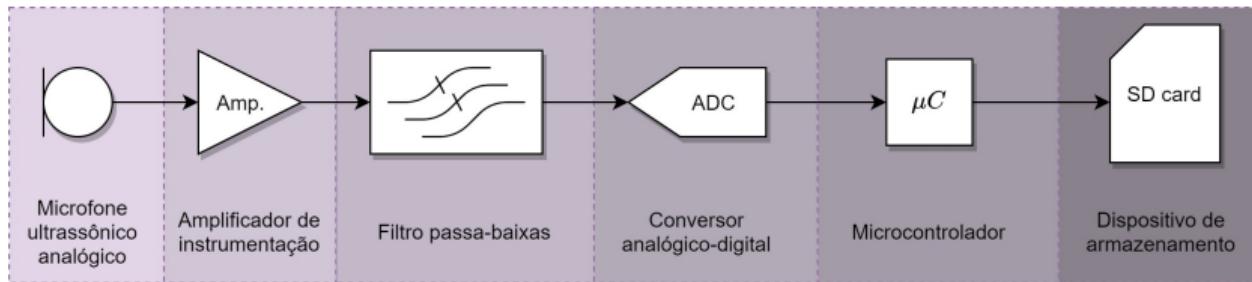
■ Métodos de registro: [Brudzynski, 2018]

- Frequência de amostragem: 250 kHz;
- Resolução: 16-bits;

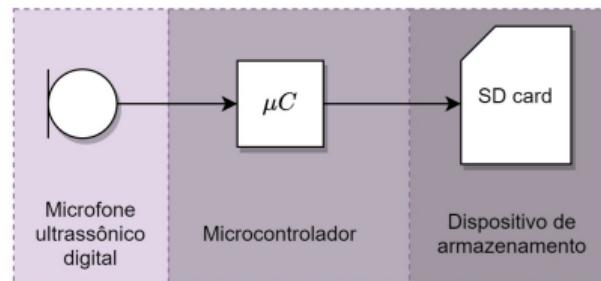
Figura: Típico programa de detecção e tratamento de USVs. (superior) spectrograma. (centro) entropia normalizada. (inferior) amplitude no tempo filtrada passa-faixa. Fonte: [Bessa, 2019b].



Sistema de aquisição de áudio

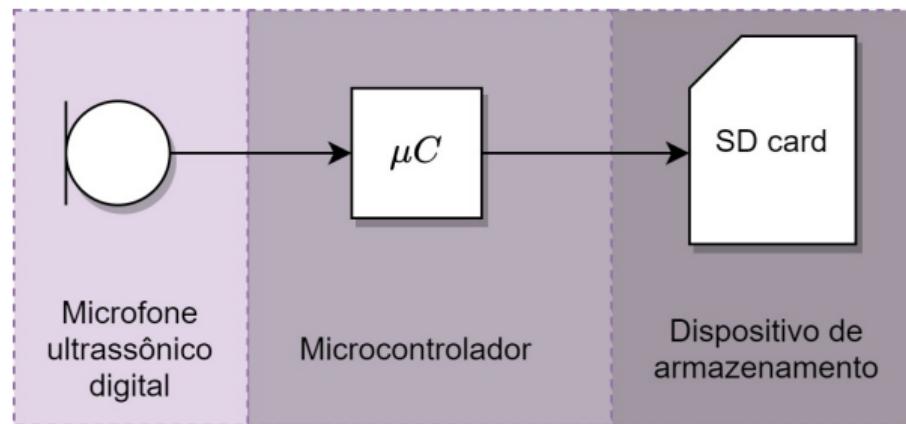


(a) Microfone com saída analógica



(b) Microfone com saída digital

Sistema de aquisição de áudio



Especificações

- Nível de pressão sonora: 60 – 100dB SPL;
- Frequência de amostragem mínima: 160kHz (banda de 80kHz);
- Resolução das amostras de áudio: 16bits;
- Dimensões do dispositivo: $2 \times 2\text{cm}^2$;
- Monitoração das condições do sistema por um LED RGB;
- Armazenamento de dados e configuração do sistema por um cartão microSD;
- Botões para operação do sistema;

Sumário

1 Introdução

2 Desenvolvimento do sistema de aquisição

Requisitos

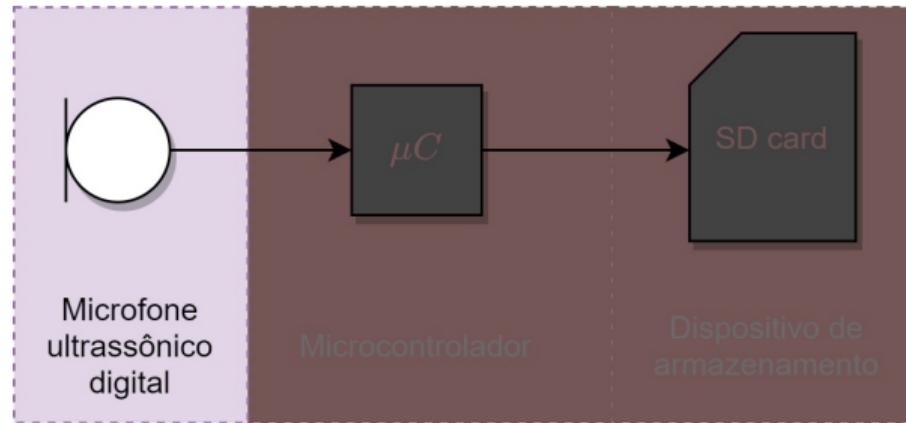
Arquitetura

Protótipos

3 Resultados

4 Conclusões

Microfone



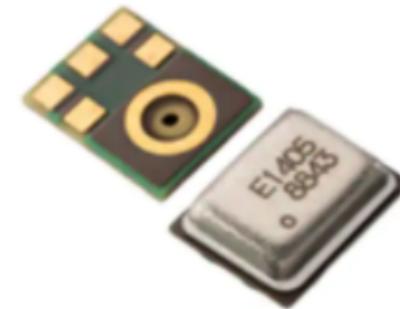
Microfone: Knowles SPH0641LU4H-1

Características:

- Microfone MEMS;
- Alimentação: 1.5V - 3.6V;
- ADC: modulador Sigma-Delta;
- Saída: sinal PDM de 1-bit
- Dimensões: 3.5 L x 2.65 W x 1.1 H mm;
- Diretividade: Omnidirecional;
- Faixa de frequência: 100 Hz - 80kHz;
- Modos de operação:
 - Padrão: [1.024, 2.475] MHz;
 - Ultrassônico: [3.072, 4.8] MHz

Figura: Devido a saída digital do SPH0641LU4H-1, toda a problemática de pré-amplificação e conversão A/D do sinal de áudio é eliminada. Fonte: Knowles SPH0641LU4H-1 Datasheet.

SPH0641LU4H-1



Microfone: Knowles SPH0641LU4H-1

Figura: Resposta em frequência do microfone Knowles SPH0641LU4H-1. Possui uma resposta plana durante toda a faixa audível, garantindo baixa distorção. Fonte: Knowles SPH0641LU4H-1 Datasheet.

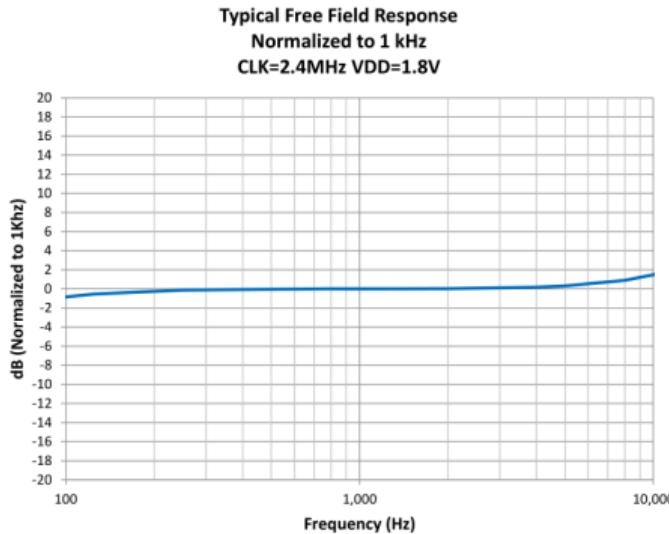
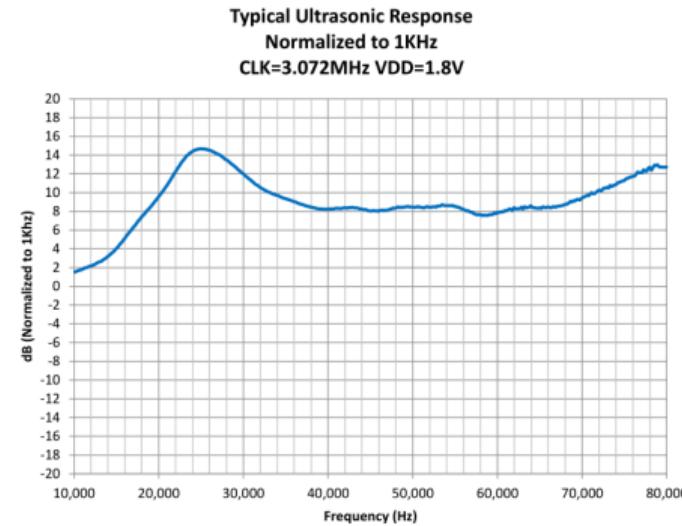
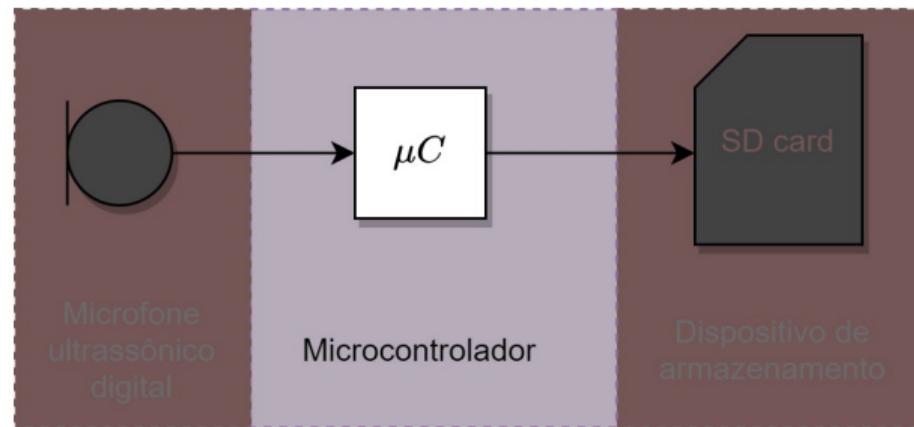


Figura: Resposta em frequência do microfone Knowles SPH0641LU4H-1. Sua resposta em frequência na faixa ultrassônica possui uma larga região aproximadamente plana entre 32-70kHz. Fonte: Knowles SPH0641LU4H-1 Datasheet.



Microcontrolador



Microcontrolador: ESP32-PICO-D4

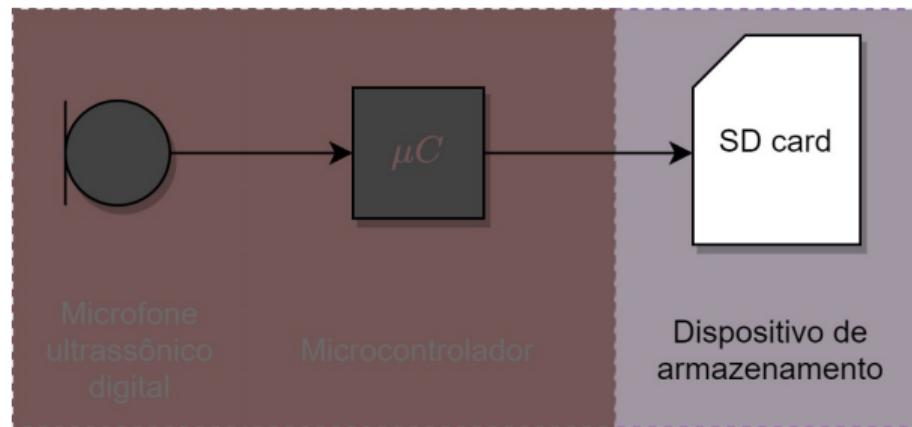
Características:

- Alimentação de 2.7-3.6 V;
- Memória *flash* de 4MB **embutida**;
- Arquitetura de 32-bits;
- Dois núcleos de 240 MHz;
- Dimensões: 7mm × 7mm × 0.94mm;
- Interfaces: SPI, SD/SDIO/MMC, PWM, UART, I2C, I2S, GPIO etc.;
- Conectividade sem fio (*Wi-Fi* e *Bluetooth*);

Figura: Vista frontal do *chip* microcontrolador ESP32-PICO-D4. Fonte: Espressif.



Dispositivo de armazenamento

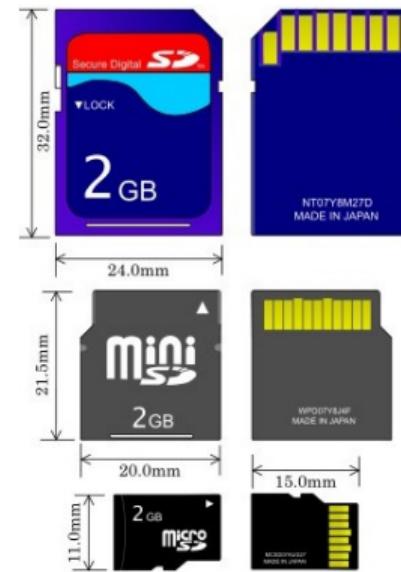


Dispositivo de armazenamento: cartão microSD

Características:

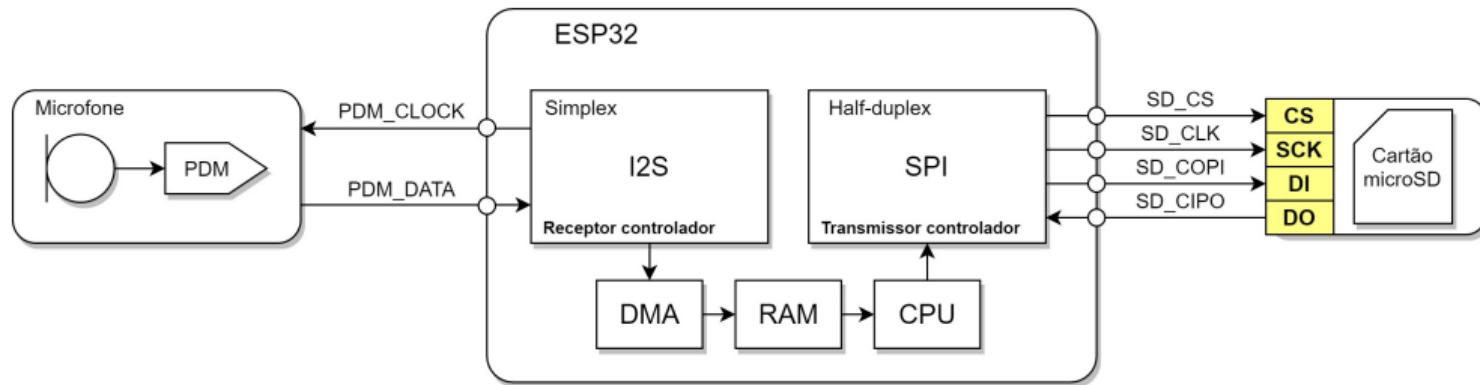
- Alimentação de 3.3V;
- Alta capacidade de armazenamento (até 1TB de espaço);
- Compacto;
- Permite comunicação SPI (ou por protocolo proprietário SD);
- Velocidade de escrita de até 90 MB/s em modo proprietário (20 – 40 MHz em modo SPI);
- Necessidade de conector;

Figura: Comparação entre tamanhos de cartões SD.
Fonte: Interfacebus.



Interface de *hardware* do sistema

Figura: Interface de *hardware* entre o microcontrolador e os periféricos.



Sumário

1 Introdução

2 Desenvolvimento do sistema de aquisição

Requisitos

Arquitetura

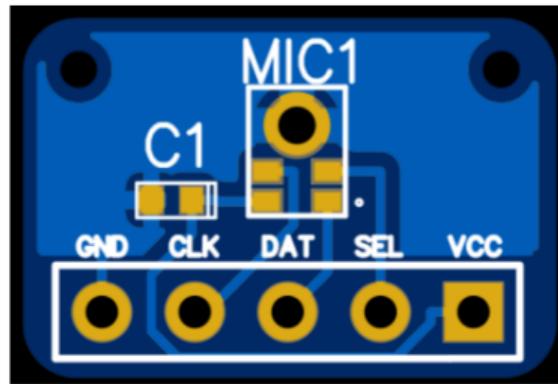
Protótipos

3 Resultados

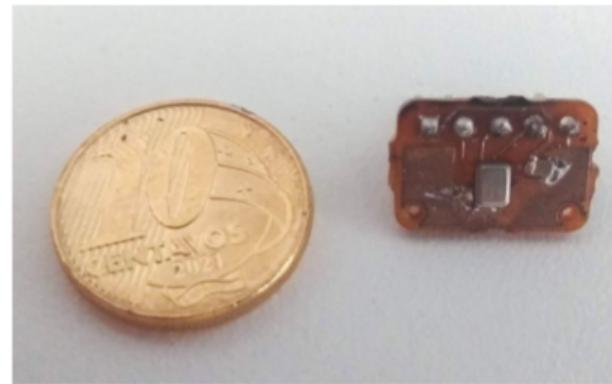
4 Conclusões

PCB: protótipo 0

Figura: PCB do protótipo 0 ($14.59 \times 9.8\text{mm}^2$) com (a) desenho 2D da PCB no software EasyEDA e (b) versão física comparada com uma moeda de 20mm de diâmetro.



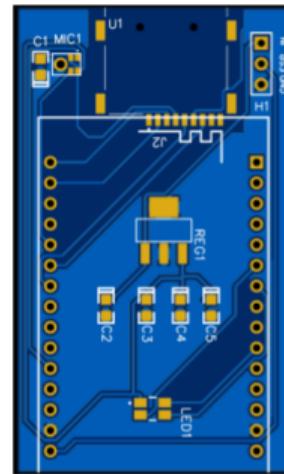
(a)



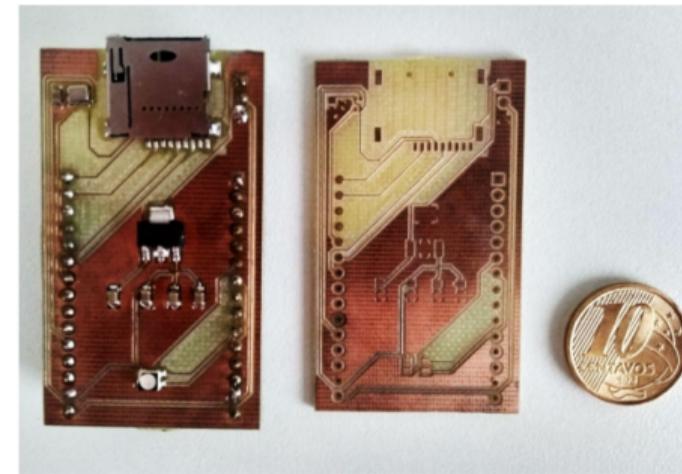
(b)

PCB: protótipo 1

Figura: PCB do protótipo 1 ($33.59 \times 57.28\text{mm}^2$) com (a) desenho 2D da PCB no software EasyEDA e (b) versão física comparada com uma moeda de 20mm de diâmetro.



(a)



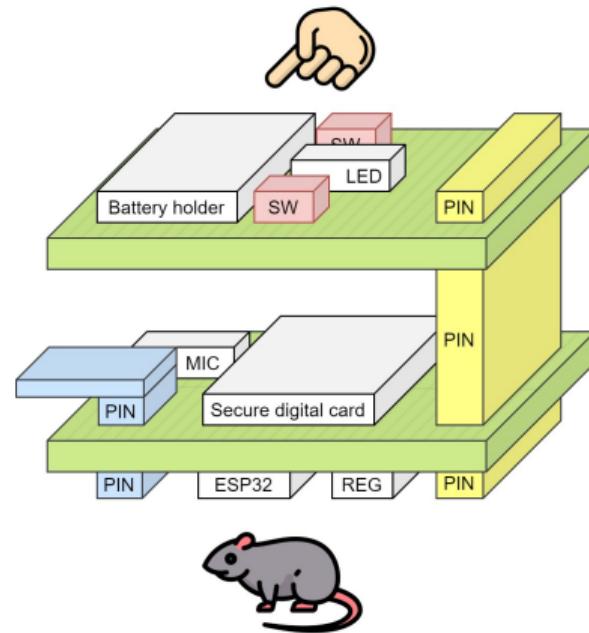
(b)

PCB: protótipo 2 (noção de ocupação)

Figura: Noção de ocupação dos componentes na PCB.

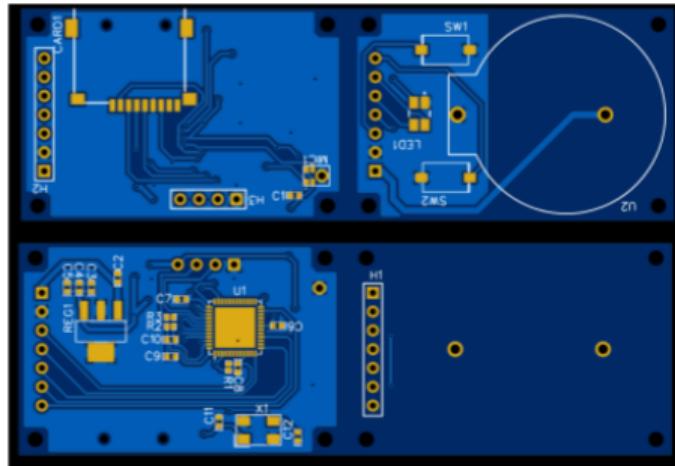
Características:

- Placa de 44.26mm × 28.70mm;
- Disposição das faces da PCB:
 - Lado externo superior: bateria (LIR2450, 100mAh) e interface com usuário (LEDs e botões);
 - Lado interno inferior: Microfone e cartão microSD;
 - Lado externo inferior: Microcontrolador e regulador de tensão;
- Massa total do sistema: $\approx 11\text{g}$ (sem bateria);
- Corrente teórica total: 105 mA.

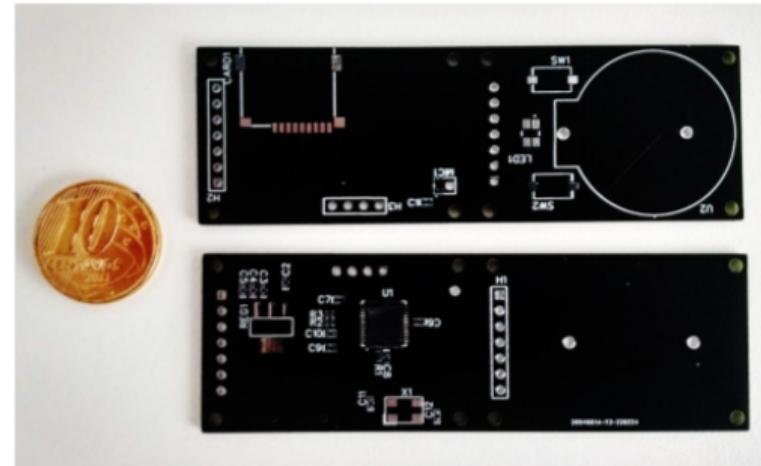


PCB: protótipo 2

Figura: PCB do protótipo 2 ($44.26 \times 28.7\text{mm}^2$) com (a) desenho 2D da PCB no software EasyEDA e (b) versão física comparada com uma moeda de 20mm de diâmetro.



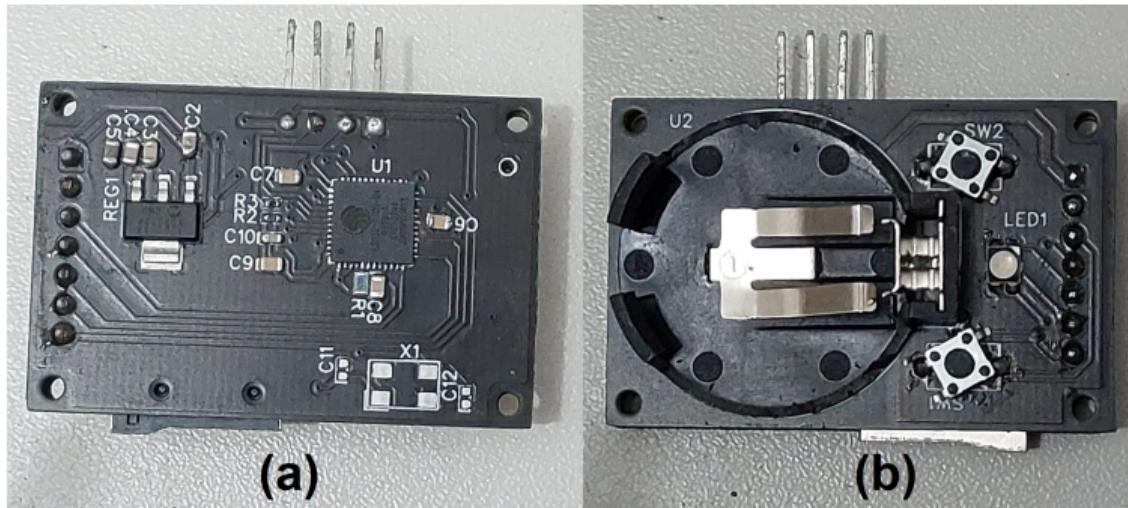
(a)



(b)

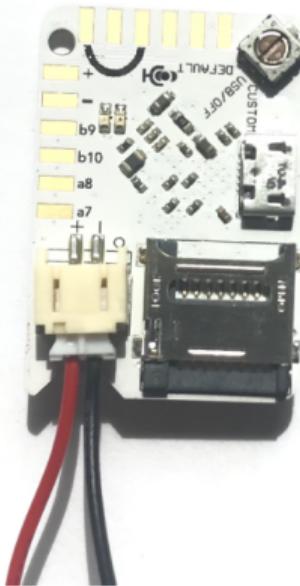
PCB: protótipo 2

Figura: PCB do protótipo 2 com os componentes soldados ($44.26 \times 28.7\text{mm}^2$) pesando ao todo 11g sem bateria e preço estimado em U\$15, representado com a visão (a) inferior externa (área de contato com o animal) e visão (b) superior externa (interface com o usuário).

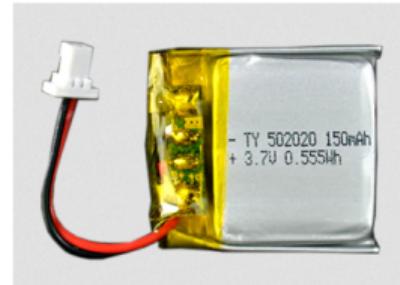


Solução correlata (recente)

Figura: μ Moth solução da Open Acoustic Devices lançado em Agosto de 2021.



μ Moth
32 x 24 mm
5 g



Bateria Li-Ion Polimérica
20 x 20 mm
150 mAh

Sumário

1 Introdução

2 Desenvolvimento do sistema de aquisição

Requisitos

Arquitetura

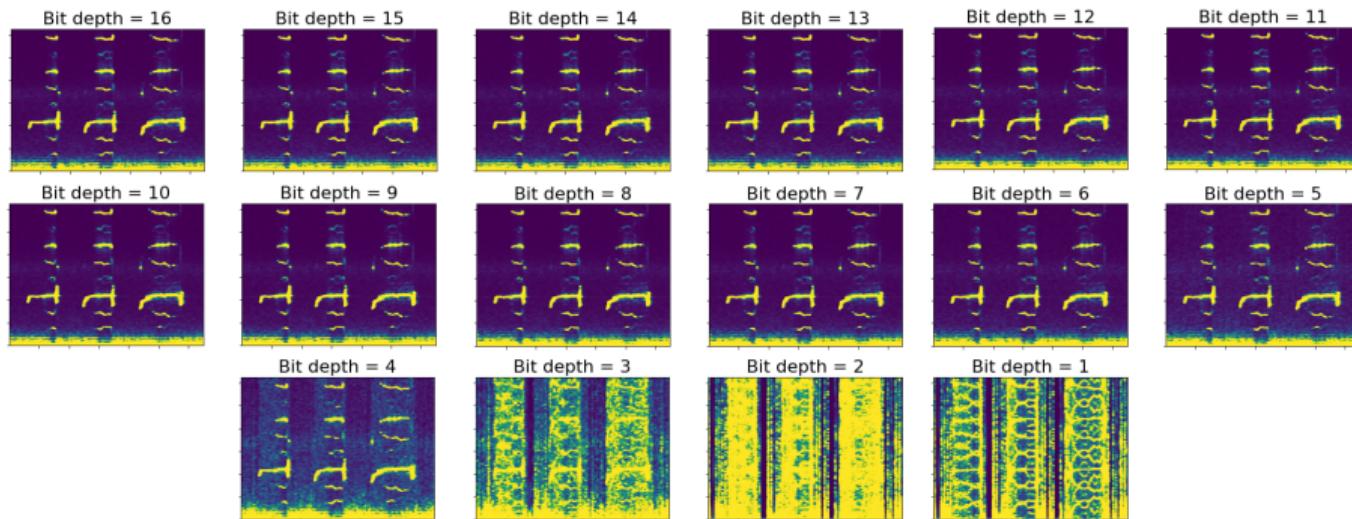
Protótipos

3 Resultados

4 Conclusões

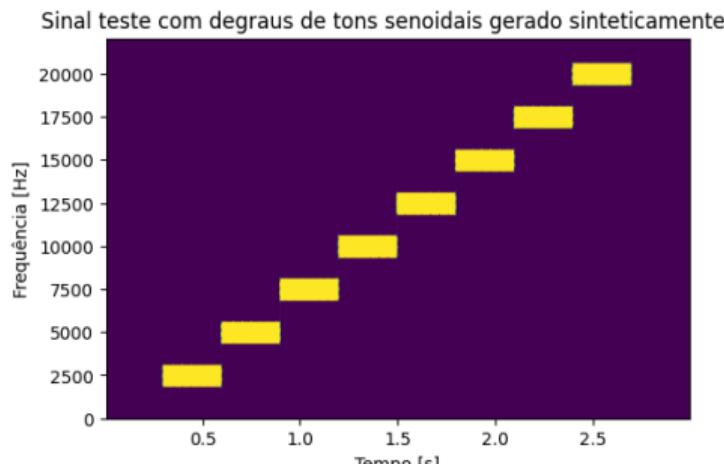
Variação dos bits de resolução do áudio de USVs

Figura: Espectrogramas calculados com base no mesmo trecho de áudio ultrassônico com três USVs e re-quantizado para toda a faixa abaixo de 16 bits. Áudio originalmente adquirido com o sistema Ultramic 250k ([Dodotronic, 2020]) a uma taxa de amostragem de 250kHz e resolução de 16 bits

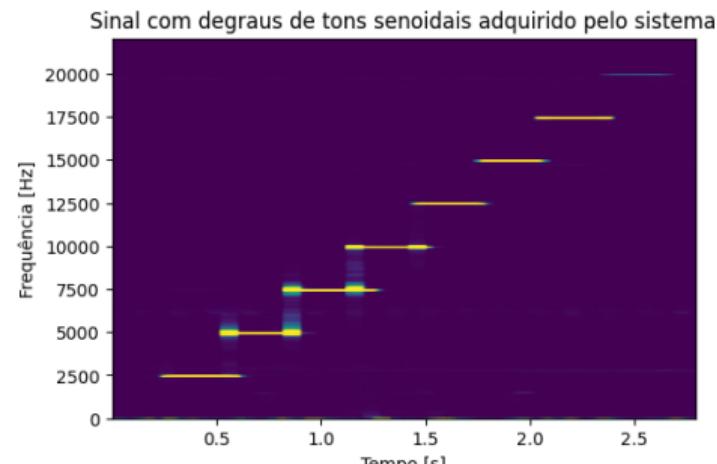


Validação na faixa audível

Figura: Espectrograma das múltiplas senoides com frequência variando em forma de degrau tocadas em um alto-falante (20Hz-20kHz) para (a) o sinal de teste e (b) o sinal adquirido no sistema de aquisição. Aquisição a 98ksps.



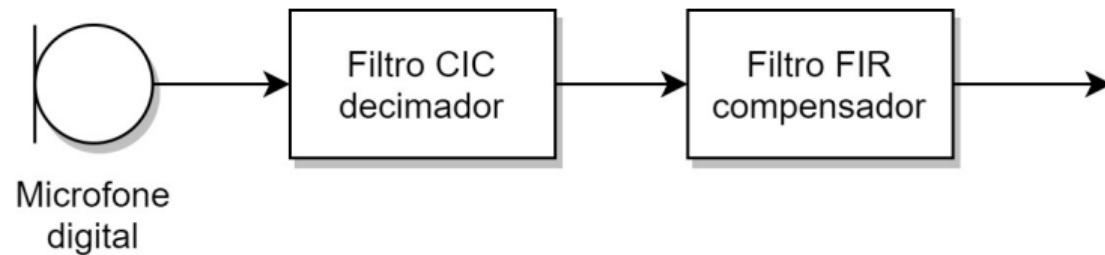
(a)



(b)

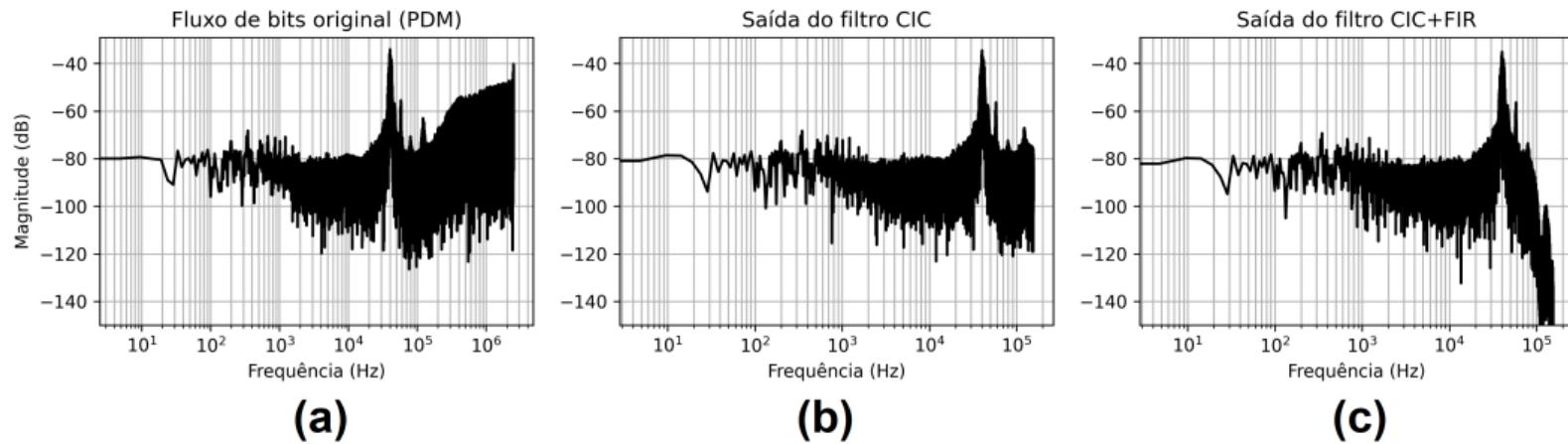
Validação na faixa ultrassônica

Figura: Cadeia de processamento do sinal PDM do microfone para conversão para PCM via *software*.



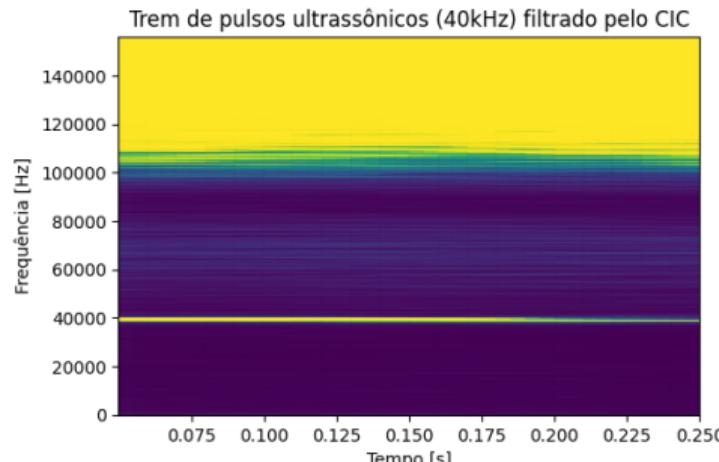
Validação na faixa ultrassônica

Figura: Magnitude do espectro de Fourier para o sinal de áudio pulsado de 40kHz obtido do sensor de proximidade adquirido ao longo da cadeia de processamento (trecho de 0.2s), i.e. (a) sinal PDM adquirido, (b) sinal PCM após a filtragem do CIC e (c) sinal PCM final após compensação do FIR ($f_c = 90\text{kHz}$). Aquisição a 312.5ksps (*clock* do microfone de 5MHz e OSR = 16).

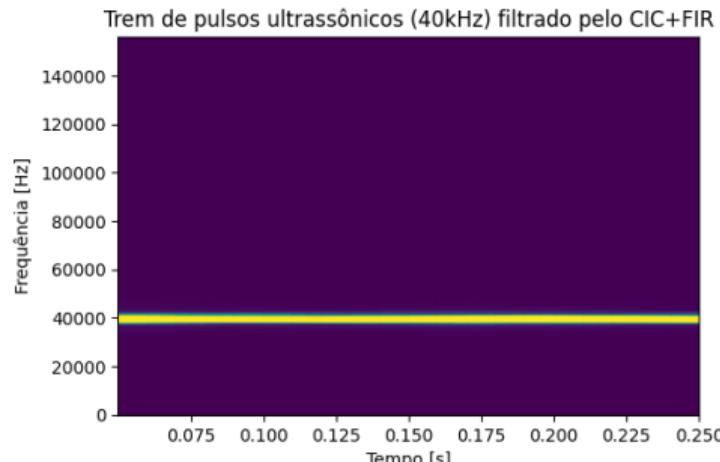


Validação na faixa ultrassônica

Figura: Espectrograma do sinal de áudio pulsado de 40kHz obtido do sensor de proximidade avaliado na (a) saída do filtro CIC e na (b) saída do filtro FIR compensador ($f_c = 90\text{khz}$). Aquisição a 312.5ksps (*clock* do microfone de 5MHz e OSR = 16).



(a)



(b)

Sumário

1 Introdução

2 Desenvolvimento do sistema de aquisição

Requisitos

Arquitetura

Protótipos

3 Resultados

4 Conclusões

Conclusões

Sugestões de metodologias a serem abordadas futuramente:

- Envio de dados por conexão sem fio;
- Inserir sensores para gerenciar a gravação por gatilhos biológicos;
- Comparar o sistema desenvolvido com alternativa sintetizada em FPGA;
- Otimizar a área consumida da PCB;

Sugestões de testes a serem feitos:

- Medir o consumo de potência real do sistema e avaliar a autonomia da bateria;
- Traçar característica de transferência do regulador de tensão;
- Realizar aquisição de áudio de roedores em experimentos;

Referências

-  Gillian Sales (1974)
Ultrasonic communication by animals
Springer Science & Business Media
-  Rafael dos Santos Bessa (2019)
Software development for the detection of ultrasonic vocalizations
5th House Symposium
-  Stefan M. Brudzynski (2018)
Handbook of ultrasonic vocalization: A window into the emotional brain
Academic Press.

Referências

-  Igor Branchi (2001)
Ultrasonic vocalisation emitted by infant rodents: a tool for assessment of neurobehavioural development
Elsevier - Behavioural brain research
-  Avisoft Bioacustics (2020)
CM16/CMPA
-  Dodotronic (2016)
Ultramic UM250k
-  Andrew Hill, *et all* (2019)
AudioMoth: A low-cost acoustic device for monitoring biodiversity and the environment
Elsevier, HardwareX

Referências

-  AK Fledermausschutz Aachen (2017)
Raspberry Pi Bat Project
Bat Pi Webpage
-  Richard Beason (2019)
AURITA: an affordable, autonomous recording device for acoustic monitoring of audible and ultrasonic frequencies
Taylor & Francis, Bioacoustics
-  Robin C. Whytock (2017)
Solo: an open source, customizable and inexpensive audio recorder for bioacoustic research
Wiley Online Library, Methods in Ecology and Evolution