

**Renato Schmidt**

## **MyPath: Módulo Sonar**

**Bauru**

**2014**



Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”

Faculdade de Ciências

Sistemas de Informação

Renato Schmidt

## **MyPath: Módulo Sonar**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado ao Conselho de Curso de Sistemas de Informação, da Faculdade de Ciências – Unesp/Bauru, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Sistemas de Informação.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Martins Morgado

Bauru

2014



Renato Schmidt

## **MyPath: Módulo Sonar**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado ao Conselho de Curso de Sistemas de Informação, da Faculdade de Ciências – Unesp/Bauru, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Sistemas de Informação.

Comissão Examinadora

---

**Prof. Dr. Eduardo Martins Morgado**  
Orientador

---

**Prof. Dr. Wilson Massashiro Yonezawa**

---

**Prof. Dr. José Remo Ferreira Brega**

Bauru, \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_.



# Agradecimentos

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Eduardo Martins Morgado pelo apoio, incentivo e confiança, não apenas no desenvolvimento deste trabalho, mas também durante toda minha trajetória nesta Universidade como membro do Laboratório de Tecnologia da Informação Aplicada – LTIA.

Agradeço também a todos os amigos e membros do LTIA que trilharam seus caminhos junto comigo. Tenho certeza que esta experiência e oportunidade foi de suma importância para minha formação e minha vida.

Agradeço a Ariane Dutra Vieira, que me deu forças e me apoiou em todas as áreas de minha vida. Sem ela este trabalho não existiria.

Agradeço a meus pais, Ednéia e Francisco, que mesmo distantes devido à geografia, me apoiaram durante minha jornada por esta Universidade.

Agradeço a todos os professores, que ensinaram não só o conteúdo de suas disciplinas, mas também ensinaram lições para a vida.



# Resumo

Neste trabalho serão apresentados técnicas e conceitos do funcionamento de sensor ultrassônicos para determinação de distâncias de obstáculos. Este tipo de sensor permite mapear as características do ambiente através do som. Com o eco gerado é possível calcular a distância entre objetos e o sensor. Baseando-se nesta técnica, este trabalho detalha a construção de um módulo protótipo que seja capaz de alertar um aplicativo para smartphones, a fim de detectar obstáculos e informá-los ao usuário através de conversão de texto em voz.

**Palavras-chaves:** ultrassônico, sensor, distância.



# Abstract

In this paper we present techniques and concepts of ultrasonic sensor measurement of obstacle distances. This type of sensor allows mapping the environment characteristics through sound. With the generated echo it is possible to calculate the distance between objects and the sensor. Based on this technique, this paper details the construction of a prototype module that is able to alert an smartphone application in order to detect obstacles and alert the user through text-to-speech voice.

**Keywords:** ultrasonic, sensor, distance.



# Listas de ilustrações

Figura 1 – Ilustração do Fluxo de Operação . . . . .	20
Figura 2 – Diagrama de blocos da solução . . . . .	23
Figura 3 – Diagrama de circuito do amplificador de saída . . . . .	25
Figura 4 – Exemplo de sinal conhecido a ser correlacionado . . . . .	26
Figura 5 – Exemplo de sinal transmitido . . . . .	26
Figura 6 – Exemplo de sinal recebido . . . . .	27
Figura 7 – Correlação entre os sinais das Figuras 4 e 6 . . . . .	27
Figura 8 – Diagrama de estados do módulo sonar . . . . .	29
Figura 9 – Sinal de 40kHz de referência . . . . .	31
Figura 10 – Análise do espectro do sinal de referência . . . . .	32
Figura 11 – Placa de desenvolvimento conectada ao circuito de interface em protoboard	33
Figura 12 – Mensagens de log do programa de testes do microcontrolador . . . . .	34
Figura 13 – BulkToTcp em execução . . . . .	35
Figura 14 – Análise de espectro realizada pelo Baudline . . . . .	36
Figura 15 – Diagrama de circuito do amplificador de entrada . . . . .	37
Figura 16 – Hardware da plataforma de experimentação, com amplificador de saída monitorado em protoboard . . . . .	38
Figura 17 – Exemplo de análise realizada para determinar distâncias . . . . .	39
Figura 18 – Saída de dados do microcontrolador, através de Bluetooth . . . . .	39
Figura 19 – Exemplo de sinal obtido pelo primeiro amplificador . . . . .	41
Figura 20 – Simulador de circuitos . . . . .	42
Figura 21 – Resultados da simulação do amplificador . . . . .	43
Figura 22 – Exemplo de sinal obtido pelo segundo amplificador . . . . .	44
Figura 23 – Sinal recebido pelo transdutor . . . . .	46
Figura 24 – Frequência de transmissão e processamento da distância . . . . .	47
Figura 25 – Medição do consumo de energia . . . . .	48
Figura 26 – Obstáculo distante 60cm . . . . .	49
Figura 27 – Obstáculo distante 80cm . . . . .	49
Figura 28 – Obstáculo distante 120cm . . . . .	49
Figura 29 – Pequeno obstáculo distante 50cm . . . . .	50
Figura 30 – Medição de distância: obstáculo a 60cm . . . . .	50
Figura 31 – Medição de distância: pequeno obstáculo a 50cm . . . . .	50



# **Lista de abreviaturas e siglas**

ADC	<i>Analog to Digital Converter</i> – Conversor Analógico para Digital
DSP	<i>Digital Signal Processor</i> – Processador Digital de Sinais
FPGA	<i>Field-Programmable Gate Array</i> – Conjunto de portas lógicas programáveis
GPS	<i>Global Positioning System</i> – Sistema de Posicionamento Global



# Sumário

1	<b>INTRODUÇÃO</b>	17
2	<b>OBJETIVO E JUSTIFICATIVA</b>	19
3	<b>EMBASAMENTO TEÓRICO</b>	21
4	<b>PROJETO DA SOLUÇÃO</b>	23
4.1	Transdutores Ultrassônicos	23
4.2	Amplificador e filtro de entrada	24
4.3	Amplificador de saída	24
4.4	Módulo Bluetooth	25
4.5	Microcontrolador e placa de desenvolvimento	25
4.6	Correlação	25
4.7	Software embarcado	27
5	<b>DESENVOLVIMENTO DA SOLUÇÃO</b>	31
5.1	Leitura de sinais analógicos	31
5.1.1	Circuito de interface	32
5.1.2	Software do microcontrolador	32
5.1.3	BulkToTcp	34
5.1.4	Baudline	35
5.2	Plataforma de experimentação	37
5.3	Implementação em microcontrolador	38
5.4	Evolução do amplificador de entrada	40
6	<b>TESTES E VALIDAÇÕES</b>	45
6.1	Sinal de entrada	45
6.2	Frequência de atualização	45
6.3	Consumo de energia	47
6.4	Testes de distância	48
7	<b>CONCLUSÕES</b>	51
	<b>Referências</b>	53



# 1 Introdução

Sensores ultrassônicos são utilizados desde 1827 para a detecção de objetos em ambientes abertos e não planejados. Foram desenvolvidos para localizar submarinos durante a Primeira Guerra Mundial (REIS, 1999). Embora inicialmente tenha sido adotado para usos militares, seus benefícios foram reconhecidos e adotados em outros setores, em estudos geográficos (BROOKER, 2009), robótica (REIS, 1999) e segurança (MASUDA; ZHANG, 2012). Além disso, devido ao seu tamanho e custo, os sensores de ultrassom também são encontrados em dispositivos de pequeno porte (ESCUDERO JR.; RAI, 2011).

A medida que os sensores reduzem de tamanho e tornam-se cada vez mais confiáveis (HEALE; KLEEMAN, 2000) é possível projetar aplicações que melhoram a qualidade de vida das pessoas. Algumas soluções que utilizam sensores ultrassônicos foram desenvolvidas visando o público deficiente visual, como é o caso do projeto de bengala eletrônica de ultrassom (BUENO, 2010), e o projeto *Sonic Glasses* (KAY, 2000), onde os sensores são acoplados em um óculos.

Baseando-se nos projetos citados acima, este trabalho apresenta uma solução desenvolvida para atender o público que possui algum tipo de deficiência visual. O objetivo foi de construir um dispositivo portátil, considerando custos e dimensões, que possa detectar obstáculos em ambientes abertos e não planejados utilizando sonar. Para maior conforto e usabilidade, este projeto utilizou um *smartphone* para se comunicar com o usuário, trazendo benefícios que vão além do monitoramento de obstáculos, como o uso integrado de GPS e comandos de voz.

O desenvolvimento foi dividido em duas etapas. Uma delas é a construção do aplicativo móvel responsável por, através de Bluetooth, adquirir os dados do microcontrolador, integrando os dados recebidos ao GPS. Isto permite alertar o usuário sobre as rotas a serem tomadas, assim como a existência de obstáculos, sendo esta etapa desenvolvida e focada no trabalho de conclusão de curso de Vieira (2014). Assim, este trabalho focará no desenvolvimento de um módulo sensor ultrassônico que identificará os obstáculos presentes no ambiente em tempo real, servindo de base para o funcionamento do aplicativo móvel.



## 2 Objetivo e Justificativa

A solução apresentada é um auxílio à locomoção e prevenção de acidentes para deficientes visuais utilizando um conjunto de mecanismos de geoposicionamento e localização de objetos em ambientes desconhecidos.

Esta solução foi desenvolvida em duas partes: a primeira consiste no desenvolvimento de um aplicativo para *smartphones* que permite ao deficiente visual traçar uma rota entre sua localização atual e um segundo ponto. Além disso, esta primeira etapa também consistiu no desenvolvimento de um hardware sonar e do software que realiza a detecção de obstáculos em um ambiente desconhecido. Assim, o aplicativo se encarrega de informar ao usuário, por voz, as direções que devem ser tomadas e, quando houver, a localização de obstáculos em seu caminho. A segunda parte consiste no aprimoramento do software embarcado no microcontrolador para permitir uma maior precisão na detecção de objetos.

O desenvolvimento do aplicativo foi realizado por Vieira (2014), em seu Trabalho de Conclusão de Curso, sendo o desenvolvimento do hardware e do software embarcado o objetivo deste projeto.

Para permitir o monitoramento de obstáculos, foi necessário desenvolver um mecanismo que permita, de forma silenciosa, discreta e confiável, medir distâncias entre o usuário e possíveis objetos em seu caminho. Por ser uma solução planejada para uso cotidiano, deve ser levado em consideração o custo e dimensões do equipamento, de forma que seja prático e acessível aos usuários.

Assim, foi desenvolvido um dispositivo de pequeno porte que fornece informações de distância em tempo real para que o aplicativo possa informar ao usuário, através de som ou vibração, dos obstáculos presentes no ambiente. Este dispositivo, e seu software, serão chamados neste trabalho como *módulo sonar*, cujo fluxo de operação é ilustrado na Figura 1.

O módulo sonar é composto por dois transdutores ultrassônicos, que são responsáveis por transmitir e receber pulsos com frequência de 40kHz, utilizados para localização de objetos através da reflexão desses pulsos (CURTIS, 2013). Estes pulsos são gerados pelo microcontrolador e amplificados antes de serem emitidos por um dos transdutores.

O segundo transdutor é responsável por receber os pulsos refletidos por objetos, cujo sinal é amplificado antes de ser adquirido pelo conversor analógico-digital do microcontrolador e então processado para calcular o intervalo de tempo percorrido entre o envio do pulso e a reflexão deste em um obstáculo.

O microcontrolador e seus circuitos de apoio estão localizados em uma placa de desenvolvimento Stellaris Launchpad EK-LM4F120XL, do fabricante Texas Instruments. Isto permitiu

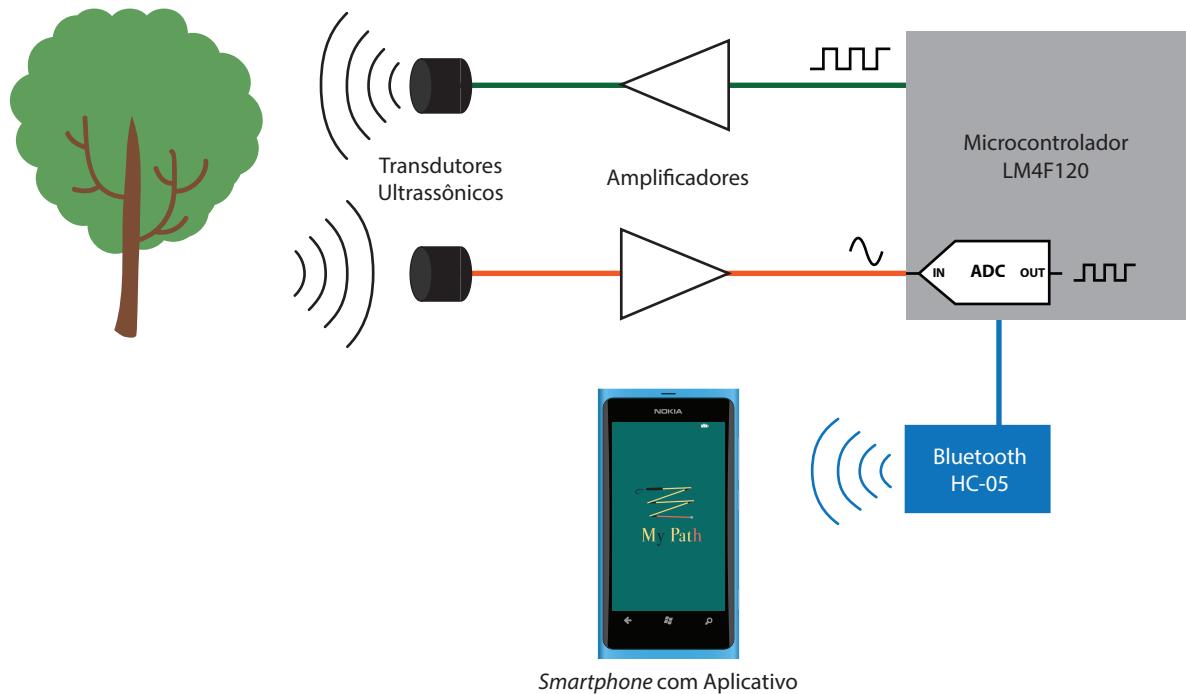


Figura 1 – Ilustração do Fluxo de Operação

uma maior facilidade na prototipagem do software e do hardware do módulo sonar, já que dispensa a necessidade de confecção de uma placa de circuito impresso específica a cada etapa de desenvolvimento do protótipo.

O software embarcado no microcontrolador é responsável por controlar a transmissão dos pulsos e analisar o sinal recebido, a fim de determinar a existência e a distância de objetos no caminho do usuário. Estas informações são enviadas para o *smartphone* através de um módulo de comunicação *Bluetooth* HC-05, para então serem exibidos pelo aplicativo de navegação.

O uso de placas de desenvolvimento e módulos de comunicação comerciais é justificado pelas características do uso de componentes de alta frequência de operação e do caráter de protótipo que este projeto possui, sendo este trabalho focado no software e na análise de sinais realizadas em meio digital, e não no projeto, desenvolvimento e fabricação de hardware.

### 3 Embasamento teórico

Um transmissor ultrassônico é um componente que converte pulsos elétricos em vibrações mecânicas. Ao transmitirmos pulsos em uma frequência de 40kHz, eles são refletidos nos obstáculos com densidade maior do que a do ar, retornando ao transmissor (CURTIS, 2013) e permitindo a medição do tempo necessário para que o sinal do pulso vá, colida com o objeto e volte.

A física mecânica define a velocidade como uma relação entre distância e tempo, cuja equação é:

$$v = \frac{d}{t},$$

onde  $v$  é a velocidade,  $d$  a distância e  $t$  o tempo (FEYNMAN, 2010).

A velocidade do som depende da elasticidade do meio e da inércia de suas partículas, e no caso do ar, pode ser aproximada pela equação:

$$v = 331 \times \sqrt{\frac{T}{273}},$$

onde  $T$  é a temperatura do ar em kelvin, e  $v$  a velocidade do som em metros por segundo (TIPPENS, 2007). Para temperaturas entre -33°C e 77°C, esta é uma aproximação muito boa, com erro abaixo de 0,5% (HOSANGADI, 2014). Assim, a velocidade do som no ar, para uma temperatura média de 26°C, corresponde a aproximadamente 346,40m/s.

A técnica de medição de distâncias utilizando o tempo necessário para a reflexão de um pulso ultrassônico não é uma ideia nova, e trata-se de uma técnica largamente testada e confiável. Além disso, outros projetos (BUENO, 2010; KAY, 2000) utilizam esta técnica, o que forneceu uma base para o desenvolvimento deste projeto. No entanto, o processamento de sinal nestes trabalhos é realizado de forma analógica, enquanto este projeto realiza o processamento e análise de sinal de forma digital.



## 4 Projeto da Solução

O módulo sonar do MyPath é um conjunto de hardware básico e um software embarcado que juntos permitem a medição de distâncias através do eco de pulsos ultrassônicos.

O fluxo de funcionamento do módulo é ilustrado no diagrama de blocos da Figura 2, onde o sinal é captado pelo transdutor de recepção (a) e passa por um filtro passa-baixa (b). Este sinal é condicionado pelo amplificador (c) e é captado pelo conversor analógico-digital do microcontrolador. O software embarcado faz as etapas de correlação e detecção de picos, e envia dados de distância para o *smartphone* através do módulo Bluetooth.

Para enviar o pulso, o software embarcado gera um sinal de 40kHz (d), que é amplificado (e) e é transmitido pelo transdutor ultrassônico (f).

As seções a seguir detalham os componentes responsáveis pelo processo de determinação de distância de obstáculos.

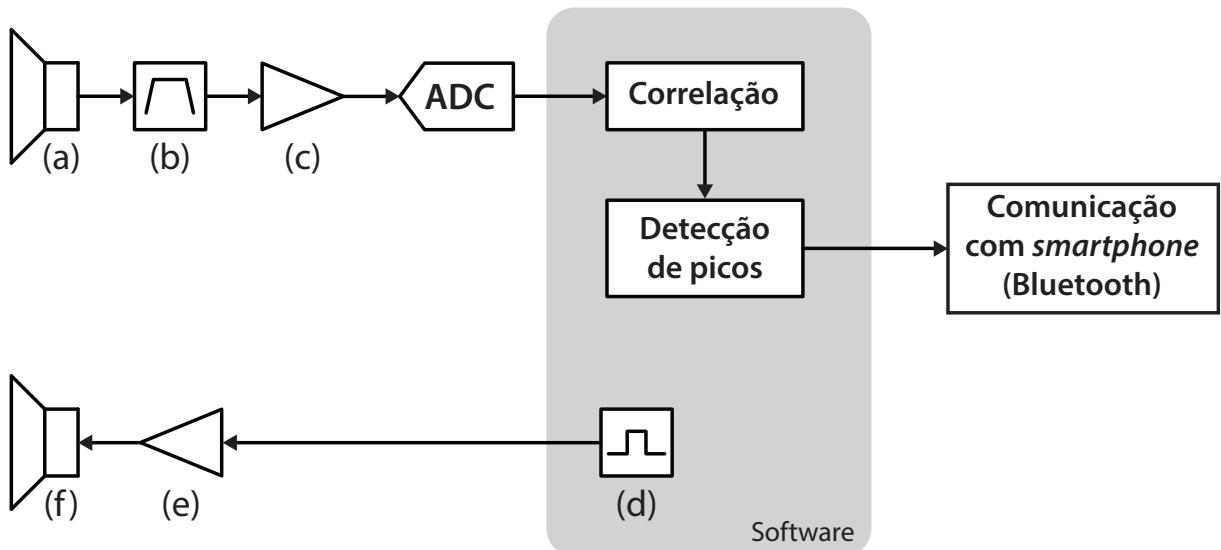


Figura 2 – Diagrama de blocos da solução: (a) filtro passa-banda; (b) amplificador de entrada; (c) gerador de sinal de 40kHz; (d) amplificador de saída

### 4.1 Transdutores Ultrassônicos

Para realizar a transmissão e recepção dos pulsos ultrassônicos foi utilizado o transdutor AT/R40-10P do fabricante Nippon Ceramic Co., Ltd. Este modelo foi escolhido devido às suas especificações e disponibilidade no mercado nacional.

Embora estejam disponíveis no mercado transdutores que já atuam no domínio digital, estes realizam o processamento de sinais de forma simples e não trazem informações como os

valores de correlação, informação essencial para a identificação mais precisa da existência de obstáculos. Desta forma, foi empregado este componente analógico a fim de realizar o processamento de sinais de forma mais completa.

Principais especificações: (NIPPON CERAMIC CO., LTD., 2001)

**Frequência Central:**  $40,0 \pm 0,7 \text{ kHz}$

**Nível de Pressão Sonora (SPL):**  $122,0 \pm 3,0 \text{ dB}$

**Tensão Máxima de Operação:**  $10 \text{ Vrms}$

**Diretividade:**  $60^\circ$  (-10dB)

## 4.2 Amplificador e filtro de entrada

O sinal recebido pelo transdutor de recepção deve ser amplificado já que seus níveis de tensão são muito baixos em relação aos intervalos aceitáveis pelo conversor analógico-digital integrado ao microcontrolador (TEXAS INSTRUMENTS, 2014).

Além disso, para que seja evitado a captura de sinais com frequências indesejadas, é necessário o uso de um filtro passa-faixa, isto é, sinais que estão abaixo ou acima de uma determinada frequência são atenuados (KUGELSTADT, 2001). Neste projeto foi utilizado um filtro passa-faixa ativo utilizando um amplificador operacional (*op-amp*), ou seja, além de realizar a limitação da faixa de frequência, também é aplicado uma amplificação no sinal.

Após a filtragem inicial, o sinal é amplificado novamente por outro estágio do *op-amp*. O protótipo possui um potenciômetro que permite variar o ganho desse estágio, permitindo assim um ajuste fino no sinal que é capturado pelo ADC do microcontrolador.

## 4.3 Amplificador de saída

O microcontrolador do projeto utiliza níveis lógicos de 3,3V em suas portas de entrada e saída. No entanto, para permitir um maior alcance, é necessário operar o transdutor de transmissão em uma tensão maior. Para isso, foi utilizado o inversor lógico CD4069 em configuração ponte, como ilustrado na Figura 3., o que permite operar o transdutor com tensão de 10Vpp. (RAJU, 2001)

O inversor lógico utiliza tensão de 5V, então é necessário empregar um transistor para realizar a conversão dos níveis lógicos.

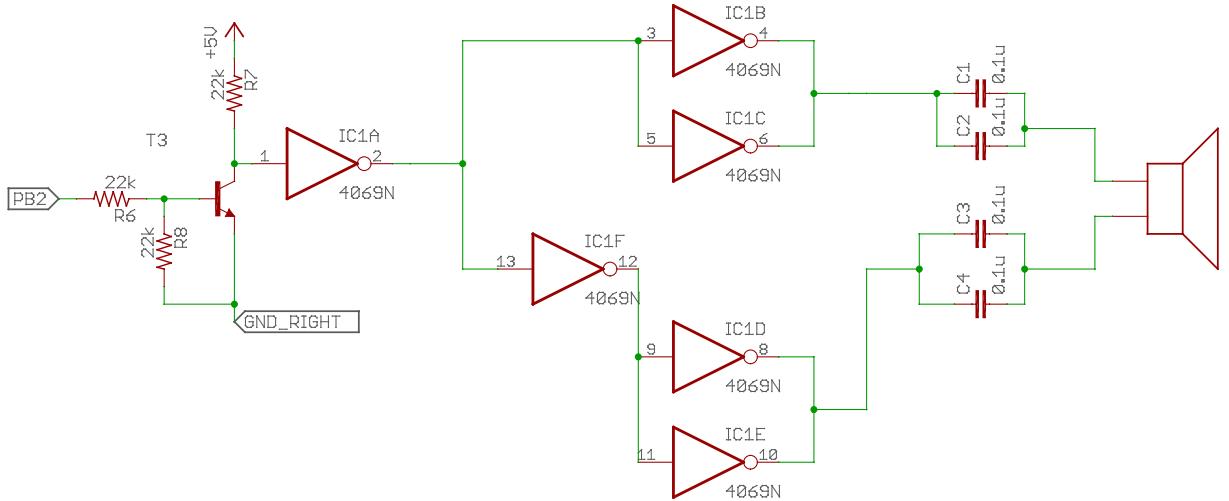


Figura 3 – Diagrama de circuito do amplificador de saída

## 4.4 Módulo Bluetooth

Para comunicação com o *smartphone*, foi utilizado o módulo Bluetooth HC-05, do fabricante Guangzhou HC Information Technology. Este módulo contém os componentes necessários para realizar transmissão e recepção de dados sem fios, inclusive antena e circuitos de radiofrequência. O uso deste módulo facilita o desenvolvimento do protótipo, já que não é necessário desenvolver placas de circuito que trabalhem com altas frequências como a do Bluetooth. Além disso, este módulo possui um baixo custo de aquisição.

Do ponto de vista do software, o módulo HC-05 é um conversor Serial-Bluetooth (GUANGZHOU HC INFORMATION TECHNOLOGY CO., LTD., 2011), que utiliza o perfil *Serial Port Profile* especificado no padrão Bluetooth 1.1 (BLUETOOTH SIG, 2001). Desta forma, ao utilizar protocolos e especificações padrões, há um amplo suporte dos sistemas operacionais utilizados para desenvolvimento e execução do aplicativo para *smartphones*.

## 4.5 Microcontrolador e placa de desenvolvimento

Para permitir o desenvolvimento com microcontroladores, foi utilizada a placa de desenvolvimento Stellaris Launchpad EK-LM4F120XL. Este modelo foi escolhido devido ao seu baixo custo de aquisição e alto poder de processamento, já que contém um microcontrolador ARM Cortex-M4F de 80MHz.

## 4.6 Correlação

Para realizar o processamento de sinal no meio digital, foi utilizada a técnica de correlação, que permite mensurar e identificar a existência e a localização de uma amostra de sinal

conhecida dentro de um sinal recebido com ruídos. Isto é, o valor correlacionado é maximizado quando as características do sinal recebido se aproximam das características do sinal conhecido.

Seja  $a$  o vetor de amostras recebidas, e  $b$  o vetor de amostras conhecidas, o sinal correlacionado  $c$  é dado por:

$$c[i] = \sum_{j=0}^m (a[i+j] \times b[j]),$$

onde  $n$  é a quantidade de amostras obtidas e  $m$  a quantidade de amostras conhecidas, e  $i = \{0, 1, \dots, n - m - 1\}$ . (SMITH, 1997)

As Figuras 4 a 7 demonstram as propriedades da correlação de sinais. Na Figura 7 é possível notar que, mesmo com uma grande presença de ruído no sinal recebido, a função de correlação permite encontrar a posição do pulso transmitido, de forma a produzir um pico que indica a maior correlação entre os sinais.

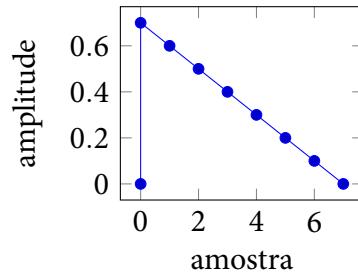


Figura 4 – Exemplo de sinal conhecido a ser correlacionado

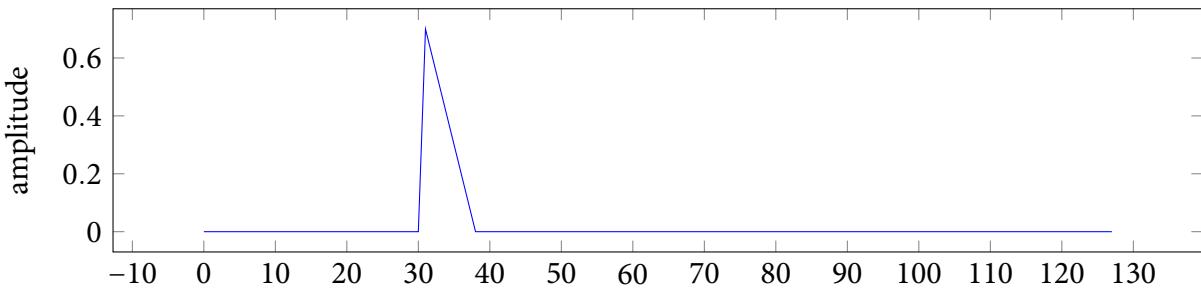


Figura 5 – Exemplo de sinal transmitido

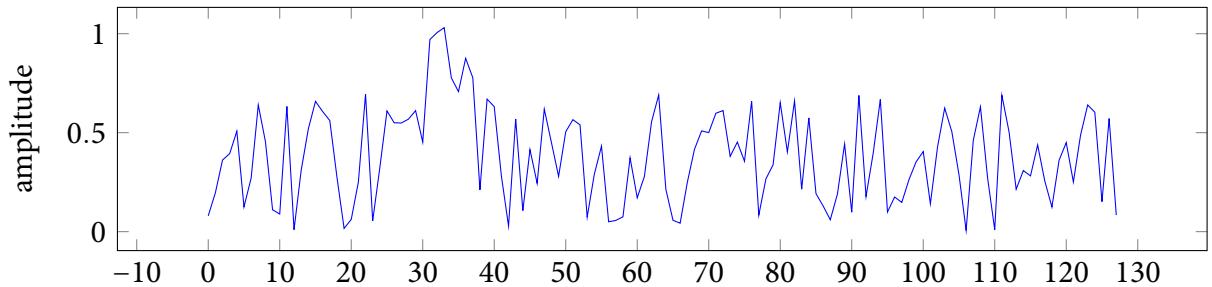


Figura 6 – Exemplo de sinal recebido

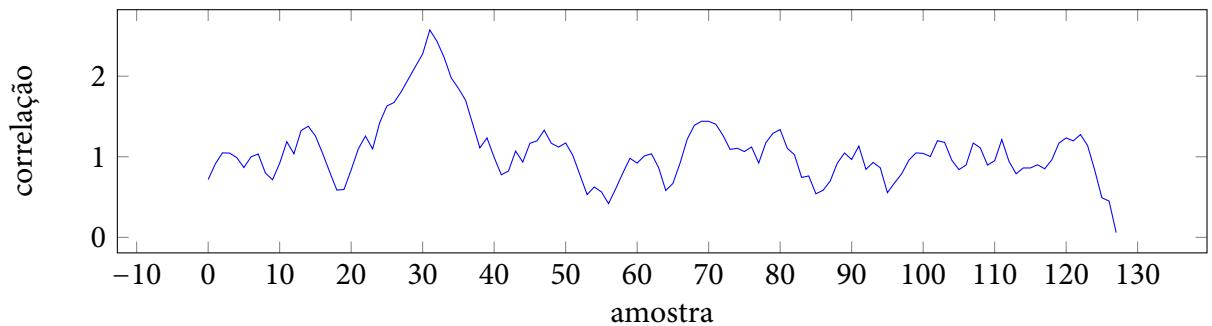


Figura 7 – Correlação entre os sinais das Figuras 4 e 6

Diferentemente de outros projetos que realizam a correlação utilizando hardware específicos, como FPGAs e DSPs, este trabalho utilizou a correlação por software, que permite um menor custo por dispositivo, já que o custo de um microcontrolador é menor do que o de um FPGA<sup>1</sup>. Além disso, deve-se levar em conta que o desenvolvimento para um microcontrolador é realizado principalmente em linguagem C, o que permite a prototipagem do código em ambiente PC e maior familiaridade para desenvolvimento; enquanto o código para FPGAs é escrito em linguagem própria, como VHDL e Verilog.

## 4.7 Software embarcado

O software do módulo sonar do MyPath tem como função primordial a detecção de obstáculos no caminho do usuário, desta forma, ele realiza esta função de modo contínuo, como ilustrado no diagrama de estados na Figura 8.

Durante a etapa de inicialização, os diversos periféricos do microcontrolador – temporizador, conversor analógico-digital, interface de comunicação, entre outros componentes de suporte – são ativados e inicializados conforme as instruções do fabricante (TEXAS INSTRUMENTS, 2014).

Já na etapa de treinamento, é realizada uma captura do conversor analógico-digital para

<sup>1</sup> Comparação de preços praticados pelo fornecedor Element14, para compra de 100 unidades. Microcontrolador TM4C123AH6PMI: US\$ 5,59 ; FPGA XC3S50A-4VQG100C: US\$ 14,38

medir a tensão de polarização de referência enquanto o sistema está em repouso. Isto é necessário para obter um valor base para a realização do processo de correlação.

O algoritmo de localização de obstáculos trabalha de forma contínua, a partir da transmissão de um pulso de 40kHz. Em conjunto, ocorre a leitura do conversor analógico-digital por quatro vezes, obtendo-se o total de 2048 amostras. Isto ocorre devido às restrições da plataforma, que limitam a leitura de apenas 512 amostras por vez. Em seguida, o vetor de amostras obtidas é processado pelo algoritmo de correlação, que visa localizar as amostras recebidas que mais se aproximam do sinal enviado.

Em seguida, um simples algoritmo de localização de picos busca o valor máximo local acima de um determinado valor de correlação – obtido de forma experimental – e calcula a distância através da metodologia descrita no capítulo 3, transmitindo estas informações para o *smartphone* através do módulo Bluetooth.

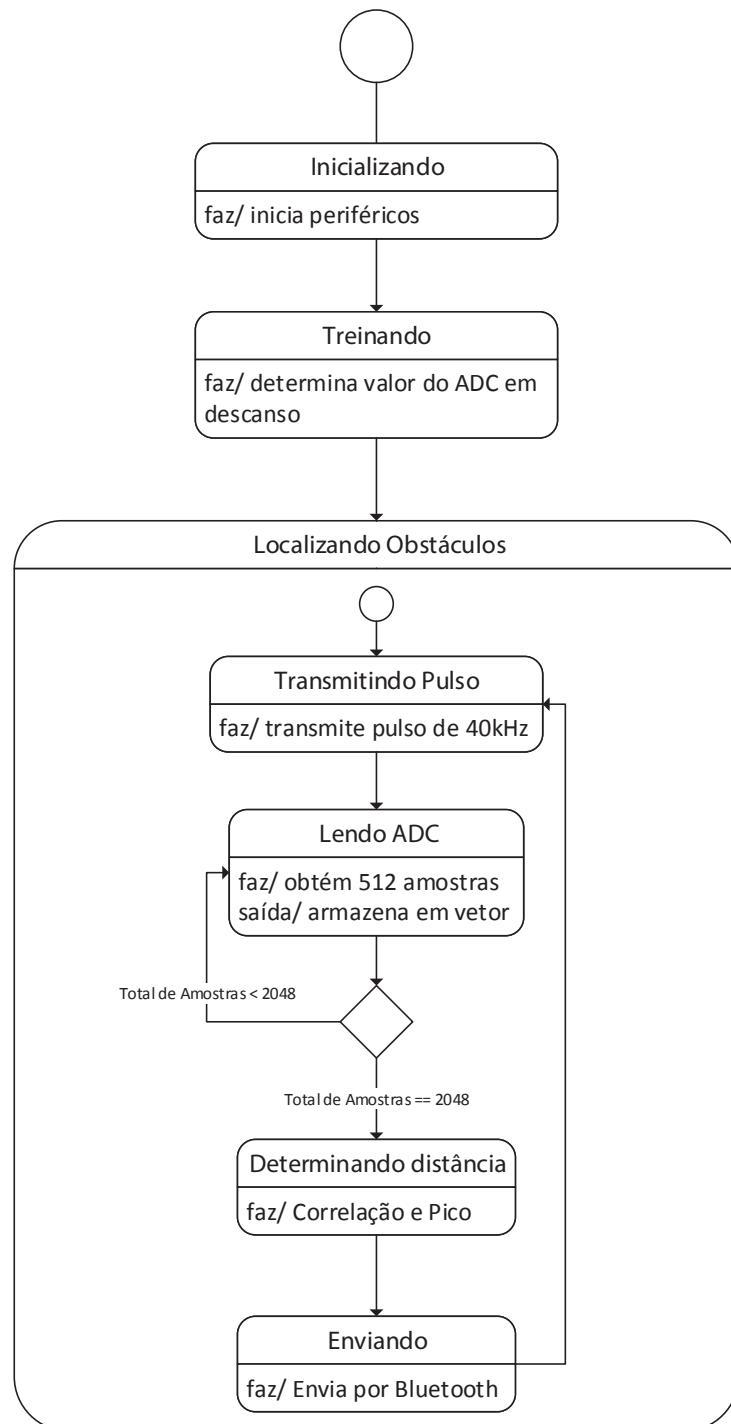


Figura 8 – Diagrama de estados do módulo sonar



# 5 Desenvolvimento da solução

Para alcançar os objetivos deste projeto, houve a necessidade de se realizar testes e experimentos para verificar a viabilidade de desenvolvimento e validar os dados obtidos com os esperados para o hardware e o software especificados. As seções a seguir apresentam estes testes e experimentos.

## 5.1 Leitura de sinais analógicos

O primeiro teste para verificar a viabilidade e dificuldade de desenvolvimento foi a realização de leitura de sinais analógicos da Stellaris Launchpad. Assim, foi desenvolvido, para o microcontrolador, um programa que realiza a captura de amostras (*samples*) e as envia, pela interface USB, ao computador para posterior análise; no computador, um programa que recebe os dados da porta USB, e reenvia os dados para uma máquina virtual Linux que contém o programa Baudline necessário para a análise.

Simultaneamente é reproduzido uma onda senoidal de 40kHz (Figuras 9 e 10) através da placa de som do computador, que está conectada através de um circuito de interface ao microcontrolador e serve de referência para os dados obtidos.

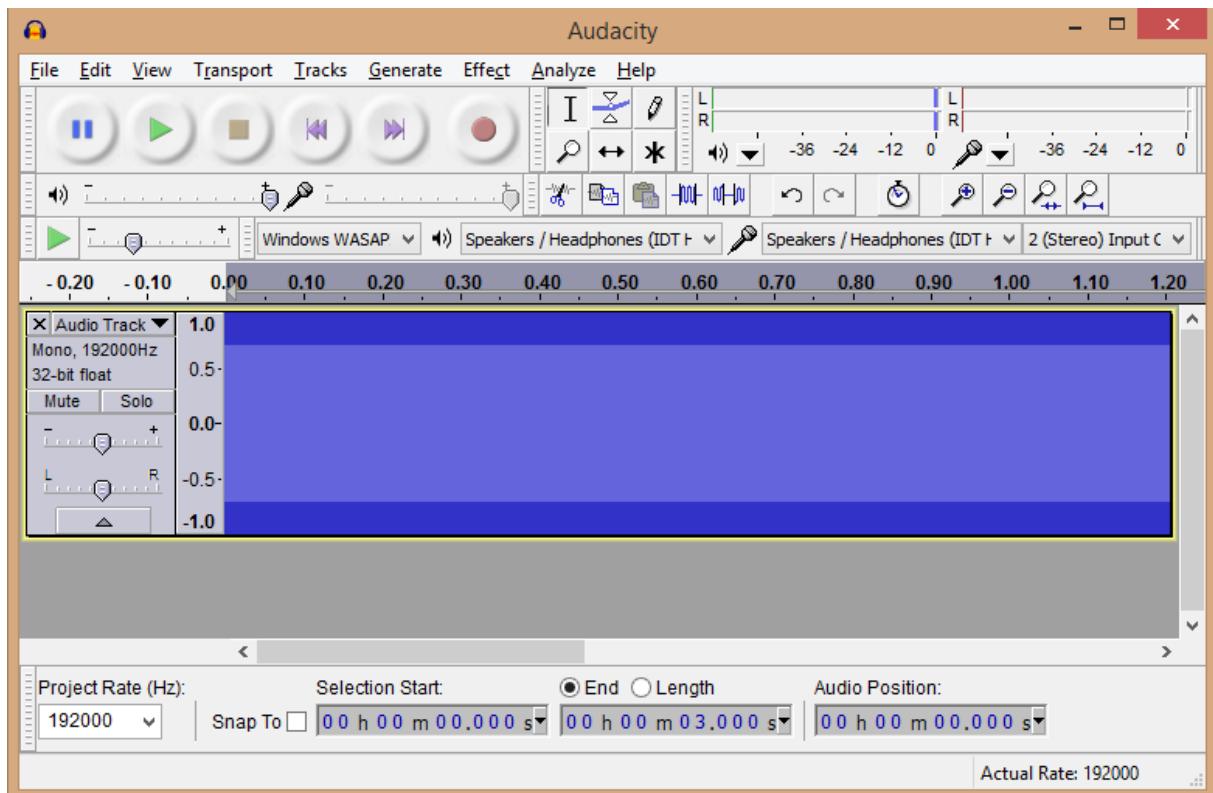


Figura 9 – Sinal de 40kHz de referência

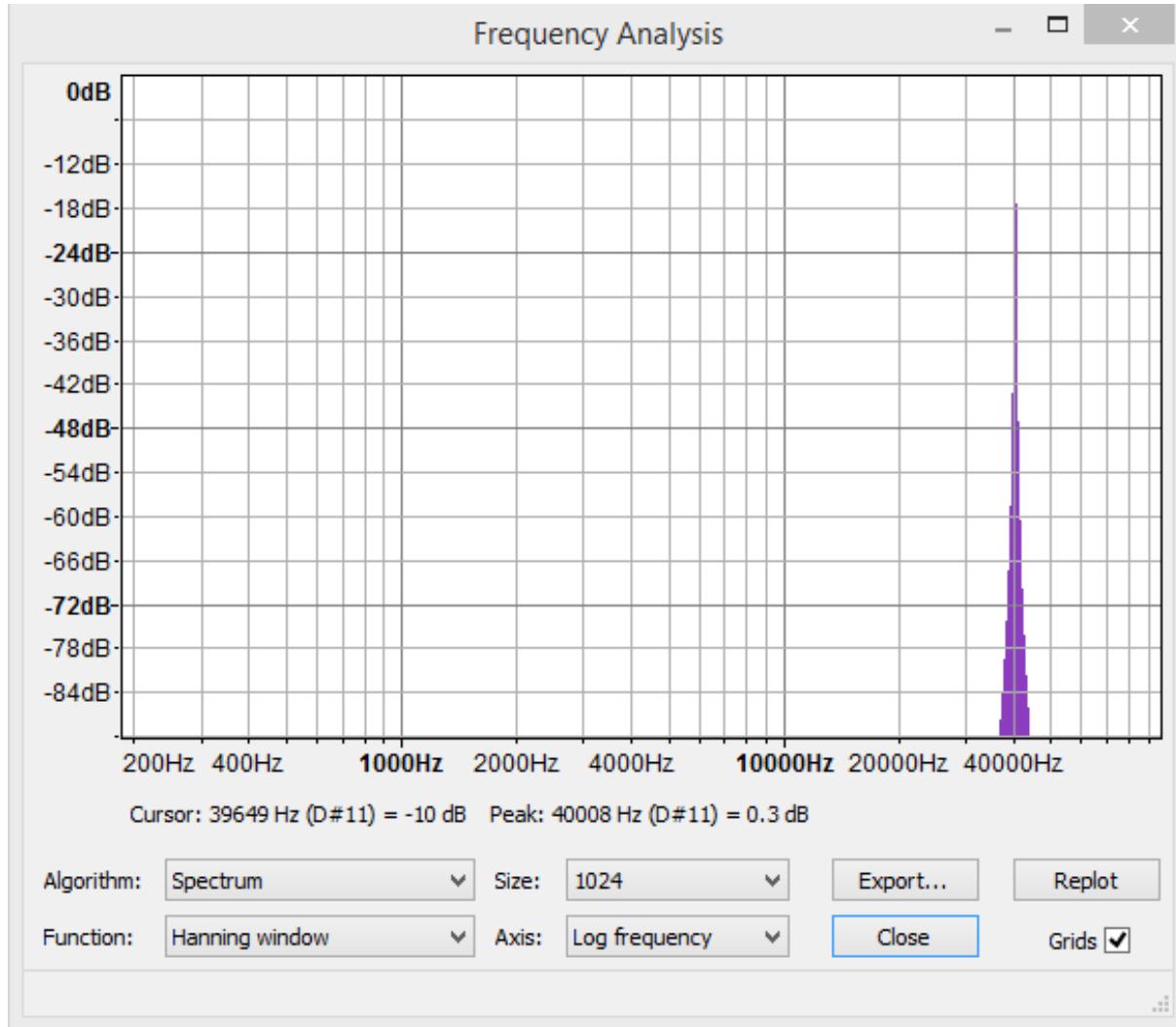


Figura 10 – Análise do espectro do sinal de referência

### 5.1.1 Circuito de interface

Para permitir a leitura através do conversor analógico-digital do microcontrolador, é necessário adicionar uma tensão de polarização (*bias*) ao sinal de áudio vindo do computador. Os sinais de áudio têm como referência o plano terra e possuem uma variação aproximada de  $\pm 1,6\text{V}$  (WILLS, 2012), enquanto o ADC opera dentro de valores entre 0 e 3,3V.

Para adicionar esta polarização, foi utilizado um circuito utilizando dois resistores de valores equivalentes em configuração divisor de tensão e um capacitor de entrada, alterando a referência do sinal de 0 para +1,65V, limitando o sinal de áudio entre 0,05V e 3,25V.

### 5.1.2 Software do microcontrolador

Foi desenvolvido um programa que realiza a captura de amostras do conversor analógico-digital a uma taxa de 88.200 amostras por segundo, isto é, 88,2 KHz. Esta frequência foi definida devido às características do transceptor ultrassônico utilizado no projeto. A frequência de fun-

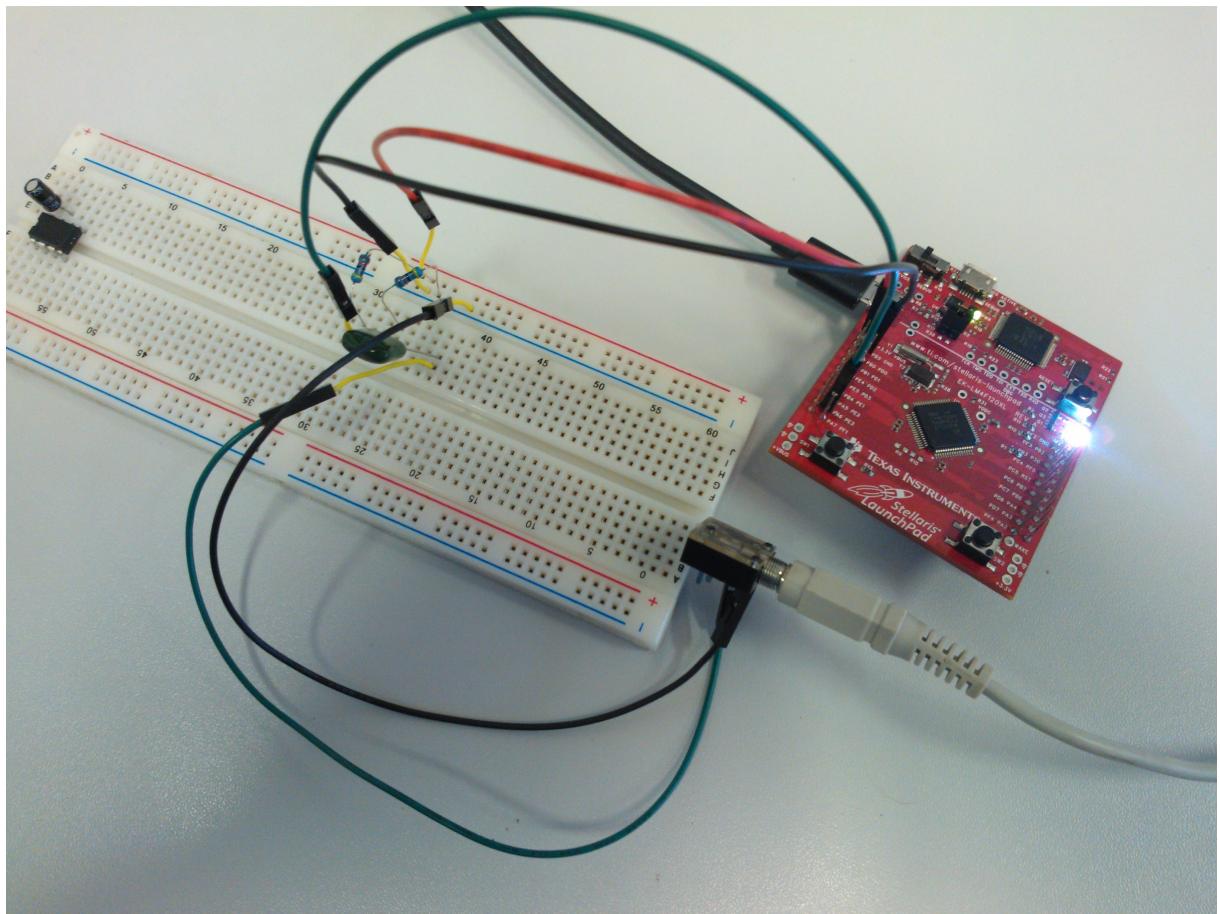


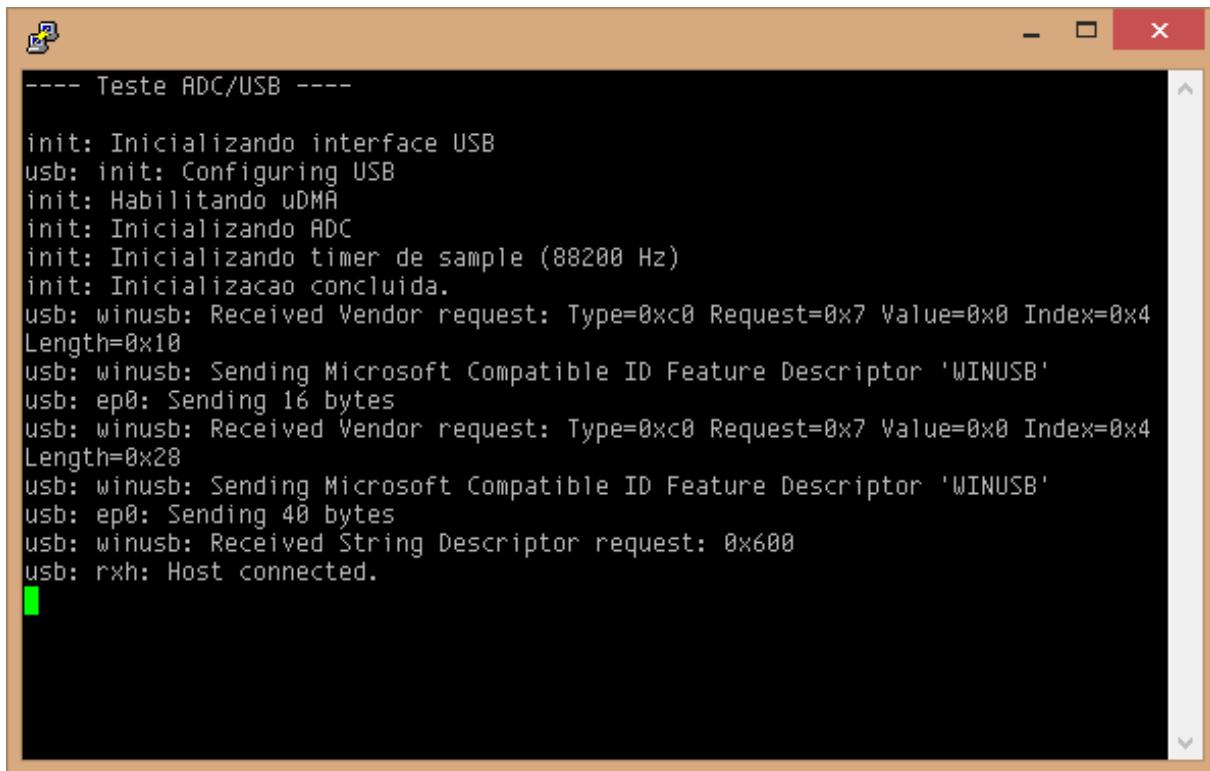
Figura 11 – Placa de desenvolvimento conectada ao circuito de interface em protoboard

cionamento do transceptor é de 40KHz, e devido ao Teorema de Nyquist (SMITH, 1997), que indica que a frequência de amostragem de um sinal analógico deve ser igual ou maior a duas vezes a maior frequência do espectro desse sinal, a frequência de amostragem escolhida foi de 88.2KHz.

Um sinal limitado em banda de energia finita, que possui apenas componentes de frequência menores do que  $W$  hertz, pode ser completamente recuperado a partir do conhecimento de suas amostras tomadas à taxa de  $2W$  amostras por segundo. (HAYKIN; MOHER, 2011)

As amostras do sinal capturado são enviadas através da interface USB, utilizando a biblioteca USB fornecida pelo fabricante do microcontrolador. Foi utilizado o protocolo de transferência *Bulk* devido a facilidade de programação para este protocolo, tanto para o microcontrolador quanto para o computador, e ao exemplo de uso disponibilizado pelo fabricante.

Não foi utilizado nenhum protocolo de camada de aplicação ou definição de estrutura de dados para a transferência das amostras: A cada 256 amostras capturadas, é realizado o envio do *buffer* de amostras.



```
---- Teste ADC/USB ----

init: Inicializando interface USB
usb: init: Configuring USB
init: Habilitando uDMA
init: Inicializando ADC
init: Inicializando timer de sample (88200 Hz)
init: Inicializacao concluida.
usb: winusb: Received Vendor request: Type=0xc0 Request=0x7 Value=0x0 Index=0x4 Length=0x10
usb: winusb: Sending Microsoft Compatible ID Feature Descriptor 'WINUSB'
usb: ep0: Sending 16 bytes
usb: winusb: Received Vendor request: Type=0xc0 Request=0x7 Value=0x0 Index=0x4 Length=0x28
usb: winusb: Sending Microsoft Compatible ID Feature Descriptor 'WINUSB'
usb: ep0: Sending 40 bytes
usb: winusb: Received String Descriptor request: 0x600
usb: rxh: Host connected.
```

Figura 12 – Mensagens de log do programa de testes do microcontrolador

### 5.1.3 BulkToTcp

O programa BulkToTcp, desenvolvido em C# para ambientes Windows, tem como objetivo receber os pacotes enviados pelo microcontrolador através da interface USB e reenviá-los através da rede para uma máquina virtual Linux que executa o programa Baudline.

Durante os testes iniciais, foi identificado que caso haja perda de pacotes no envio através da interface USB, ocorre o desalinhamento do *buffer* e consequente leitura incorreta dos dados.

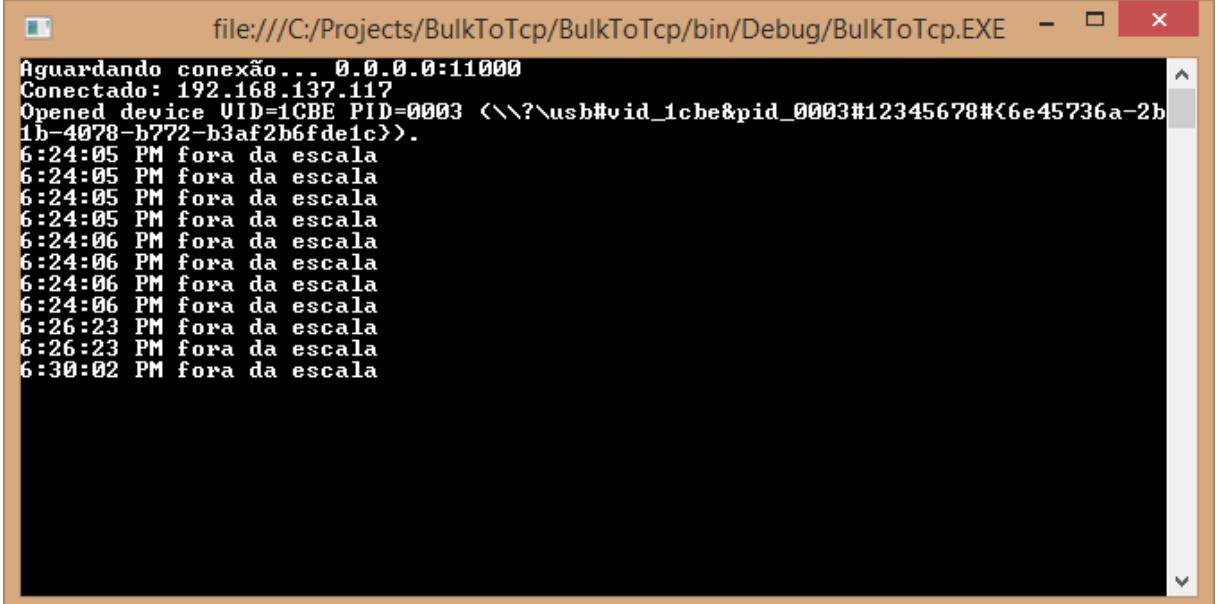
Cada amostra é armazenada utilizando-se o tipo **unsigned short** de 16 bits (2 bytes), o ADC realiza a amostragem com resolução de 12 bits e os dados são alinhados em 8 bits (1 byte).

Tipo dos dados	Tamanho	Variação (dec)	Variação (hex)
<b>unsigned short</b>	16 bits	0 – 65535	0x0 – 0xFFFF
Amostra do ADC	12 bits	0 – 4095	0x0 – 0x0FFF
<b>byte</b>	8 bits	0 – 255	0x0 – 0xFF

Tabela 1 – Tipos de dados e seus respectivos tamanhos

Levando isso em consideração, é possível realizar um tratamento de erro simples mas eficaz, verificando se o valor obtido da amostra é maior que 4095 (0x0FFF). Caso isso ocorra, é porque houve desalinhamento dos dados, então aplica-se um fator de correção na leitura do buffer, e a leitura passa a ser deslocada 1 byte para a frente. Caso o fator de correção já esteja aplicado, o fator é removido.

Após realizar a verificação e correção das amostras, os dados são enviados através de um *socket* TCP/IP para o programa cliente.



A screenshot of a Windows command-line interface window titled "file:///C:/Projects/BulkToTcp/BulkToTcp/bin/Debug/BulkToTcp.EXE". The window displays the following text:

```
Aguardando conexão... 0.0.0.0:11000
Conectado: 192.168.137.117
Opened device VID=1CBE PID=0003 <\?\usb\vid_1cbe&pid_0003#12345678#\6e45736a-2b1b-4078-b772-b3af2b6fde1c>.
6:24:05 PM fora da escala
6:24:06 PM fora da escala
6:26:23 PM fora da escala
6:26:23 PM fora da escala
6:30:02 PM fora da escala
```

Figura 13 – BulkToTcp em execução

#### 5.1.4 Baudline

Baudline<sup>1</sup> é uma ferramenta de análise de sinais desenvolvida para visualização científica, utilizando Fourier, correlação e outras transformadas.

Através do programa netcat, que realiza transferência de dados entre *sockets* TCP/IP e os fluxos padrão de sistemas Unix, as amostras enviadas pelo BulkToTcp são processadas e exibidas no Baudline.

<sup>1</sup> Software gratuito obtido em <<http://www.baudline.com>>

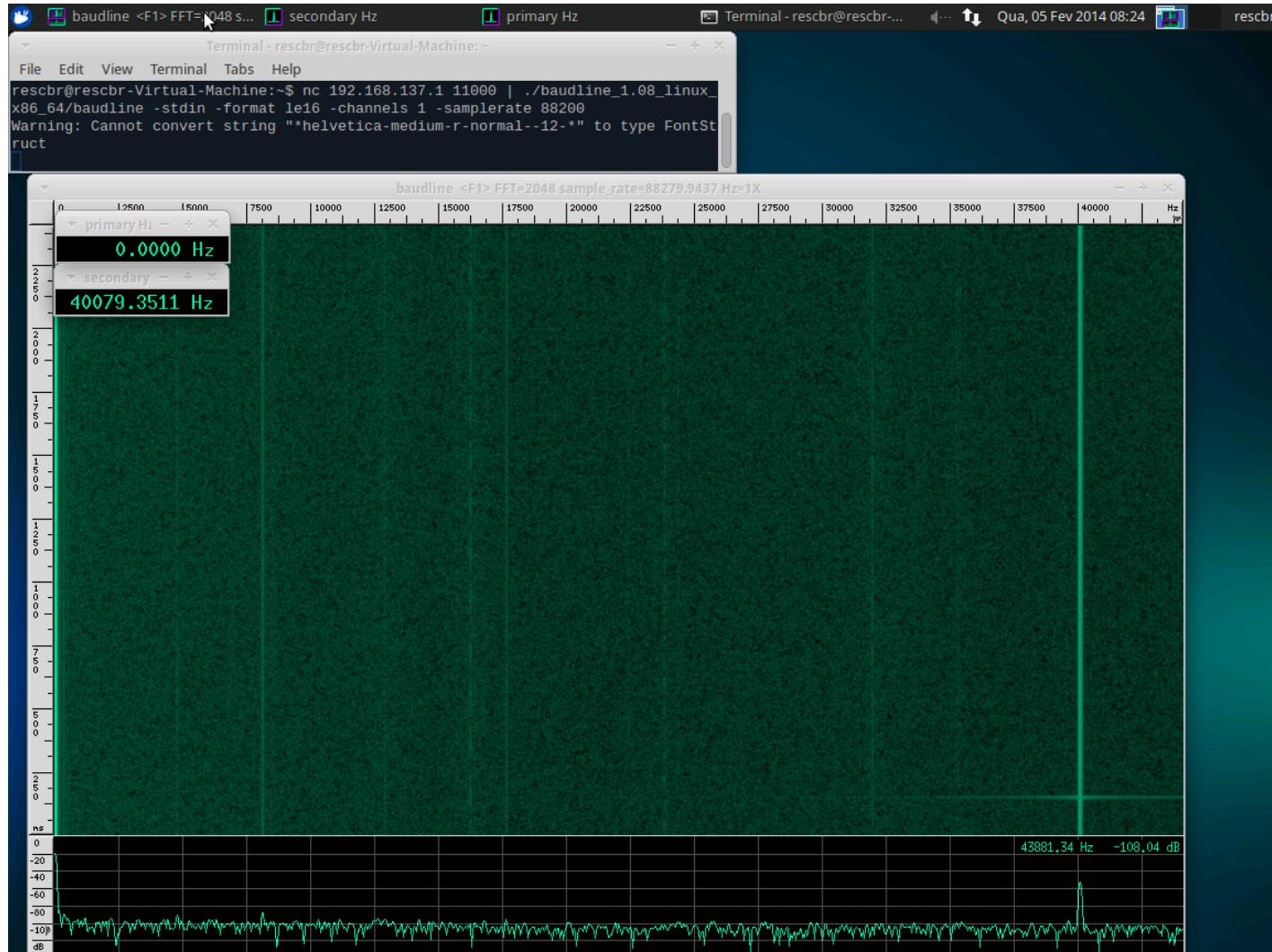


Figura 14 – Análise de espectro realizada pelo Baudline

## 5.2 Plataforma de experimentação

Devido às restrições de memória e processamento encontradas em microcontroladores, é interessante realizar testes de algoritmos em ambiente PC, permitindo validar o resultado de um algoritmo sem que haja otimizações prematuras a fim de adequar-se à estas restrições e que dificultam uma implementação correta e funcional.

Para isso, aproveitou-se o código de comunicação do BulkToTcp e adicionou-se uma interface gráfica que permite visualizar a forma de onda obtida através do conversor analógico-digital do microcontrolador.

Além disso, nesta etapa do projeto, foi implementado um gerador de pulsos de 40kHz no microcontrolador, conectado ao transceptor através do circuito amplificador de saída descrito na seção 4.3 deste trabalho.

O amplificador de entrada utilizado por esta plataforma de experimentação foi construído utilizando dois transistores em configuração emissor comum (NAJMABADI, 2003), constituindo um ganho de aproximadamente 66 vezes o sinal de entrada.

O transdutor de recepção e o amplificador constituem o circuito ilustrado na Figura 15.

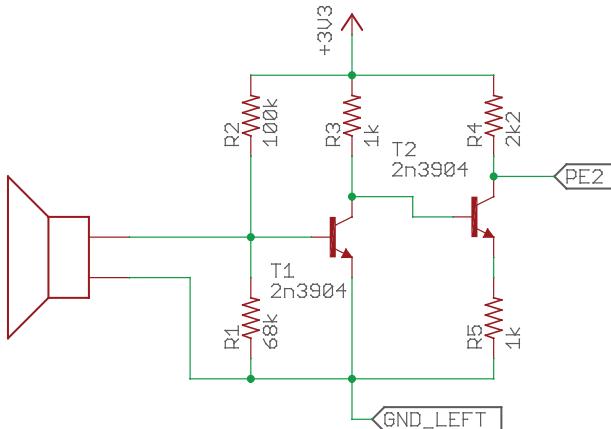


Figura 15 – Diagrama de circuito do amplificador de entrada

Desta forma, foram implementados, em linguagem C# o algoritmo de correlação descrito em Smith (1997) e um algoritmo simples de detecção de picos. Assim, é possível determinar a o intervalo de tempo entre os pulsos enviados pelo microcontrolador e pulsos recebidos correlacionados com os transmitidos. Sabendo que apenas um pulso foi emitido pelo microcontrolador, infere-se que os outros pulsos são ecos causados pela reflexão em objetos, e portanto, utilizando a equação de velocidade do som no ar, descrita na seção 3, é possível determinar a distância destes objetos ao módulo sonar.

Na Figura 17 é possível notar três picos com correlação maior que 10: o primeiro é o sinal transmitido pelo microcontrolador. Os outros são as reflexões do pulso em objetos, um distante 60 cm e outro a 2,3m.

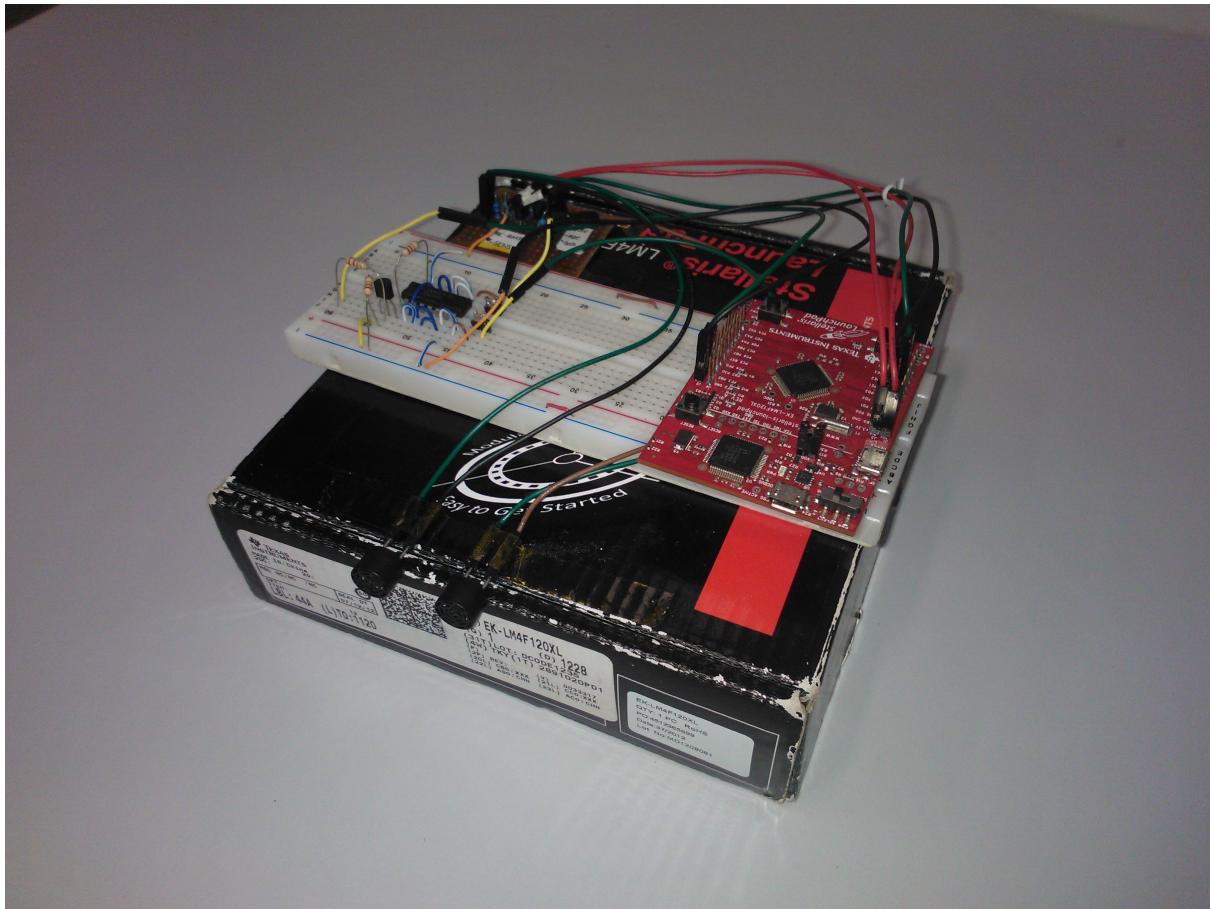


Figura 16 – Hardware da plataforma de experimentação, com amplificador de saída montado em protoboard

### 5.3 Implementação em microcontrolador

Após verificar que o processo de determinação de distância é funcional, foi realizada a implementação destes algoritmos em linguagem C para o microcontrolador. Nesta etapa não foram realizadas alterações nem otimizações nos algoritmos, exceto aquelas necessárias devido às diferenças sintáticas entre as linguagens C e C#.

Além disso, nesta etapa foi conectado o módulo Bluetooth para permitir a aquisição dos dados sem fios. A saída de dados é realizada utilizando-se uma sintaxe simples, separando-se a distância da correlação medida por um caractere de dois-pontos e cada medição por um caractere de exclamação, como a seguir: *distância:correlação!*

A saída dos dados pode ser observada utilizando-se um programa de terminal comum, como o PuTTY, já que o módulo Bluetooth é apresentado como uma interface de porta serial para o sistema operacional. A Figura 18 apresenta um exemplo de saída de dados.

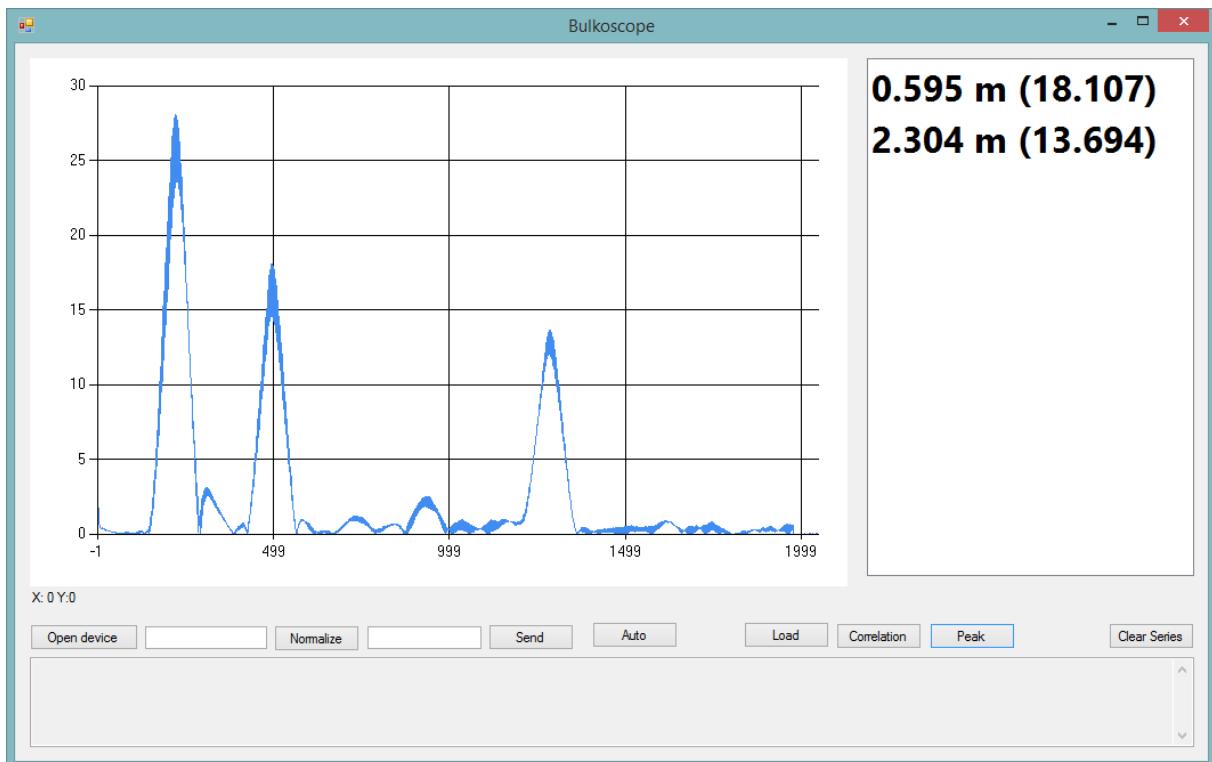


Figura 17 – Exemplo de análise realizada para determinar distâncias

The screenshot shows a terminal window with the title "rescbr@marvin:~". The window displays the following text:

```
init: --- tcc prototype 0.1 ---
init: Habilitando uDMA
init: Inicializando ADC
init: Inicializando timer de sample (80000 Hz)
init: treinamento 2537
init: Inicializacao concluida.
0.385069:5.665362!
0.497561:11.08144!
0.508378:9.401121!
0.536501:13.47727!
0.599237:5.000000!
0.484581:5.875472!
0.469438:5.730992!
0.525684:7.097701!
0.542991:5.796296!
0.542991:6.994526!
0.538664:7.139098!
0.512705:7.110905!
0.525684:7.803338!
0.555971:6.196007!
0.558134:5.820895!
0.542991:7.116541!
0.454295:5.087786!
```

Figura 18 – Saída de dados do microcontrolador, através de Bluetooth

## 5.4 Evolução do amplificador de entrada

Através da plataforma de experimentação descrita na seção 5.2, foi identificado que o circuito amplificador utilizado originalmente no protótipo (Figura 15) não apresentava um desempenho satisfatório, isto é, o sinal resultante possuía muito ruído, além de não possuir nenhum filtro. A forma de onda obtida através deste circuito amplificador pode ser vista na Figura 19. Isto acarretou em grandes variações nas distâncias calculadas, de forma a necessitar a busca de novas opções para a amplificação de sinal.

Assim, foi identificado que o uso de um amplificador operacional (*op-amp*) permitiria a construção de um filtro, além de permitir maior ganho.

Para realizar o desenvolvimento deste filtro amplificador e identificar os valores dos componentes passivos necessários, foi utilizado um simulador de circuitos. Desta forma, foi realizada a captura do sinal diretamente do transdutor enquanto eram transmitidos pulsos. Este sinal não amplificado foi alimentado ao simulador de circuitos (Fig. 20), que permitiu demonstrar a viabilidade do filtro. Os resultados da simulação são ilustrados na Figura 21.

Além do filtro, foi incluído um novo estágio de amplificação, com a adição de um potenciômetro que permite ajustar o ganho de forma experimental a fim de obter um sinal limpo e dentro dos parâmetros necessários para a captura pelo conversor analógico-digital.

A forma de onda obtida pelo amplificador construído é ilustrado na Figura 22. Nota-se que o sinal obtido pelo hardware é mais limpo do que o simulado.

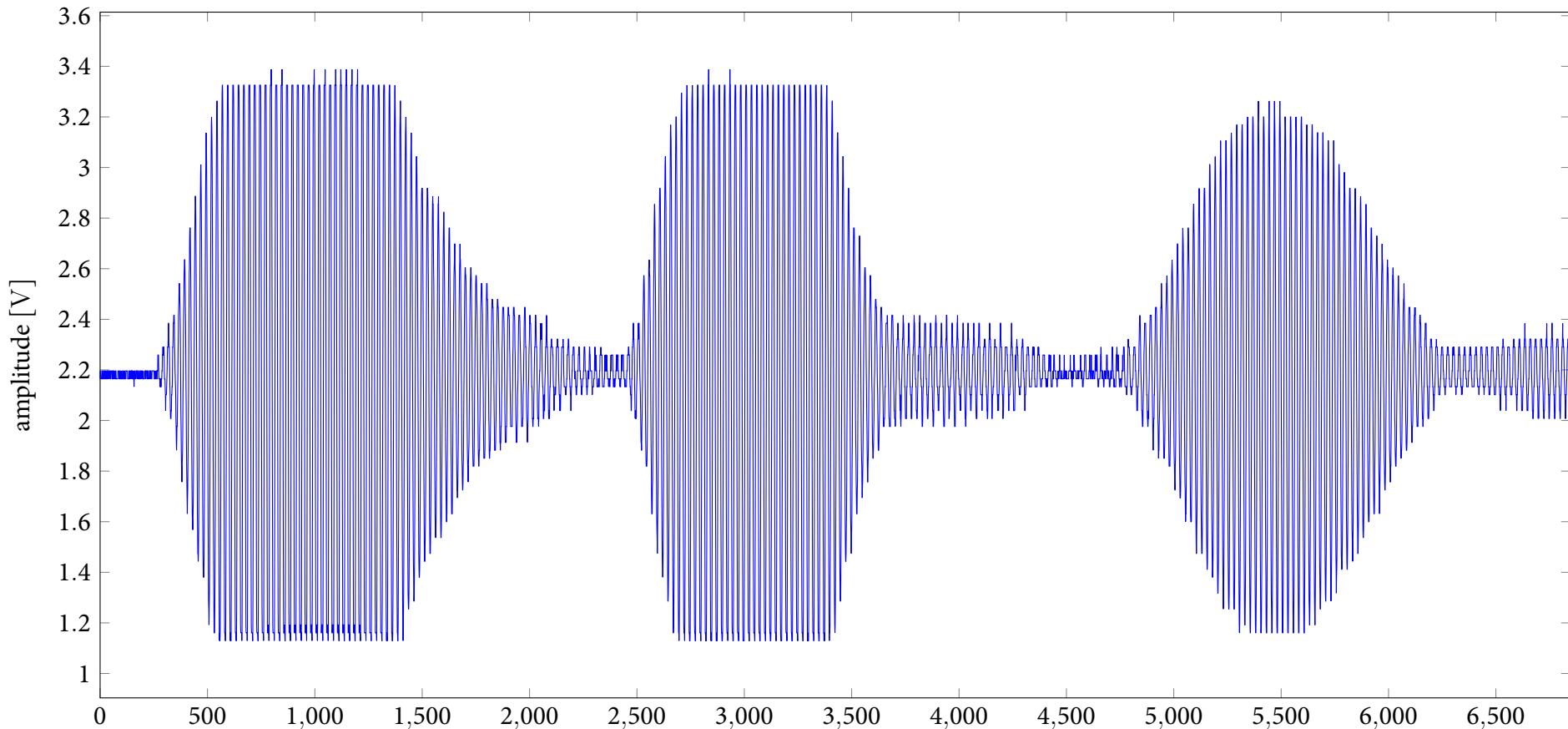


Figura 19 – Exemplo de sinal obtido pelo primeiro amplificador

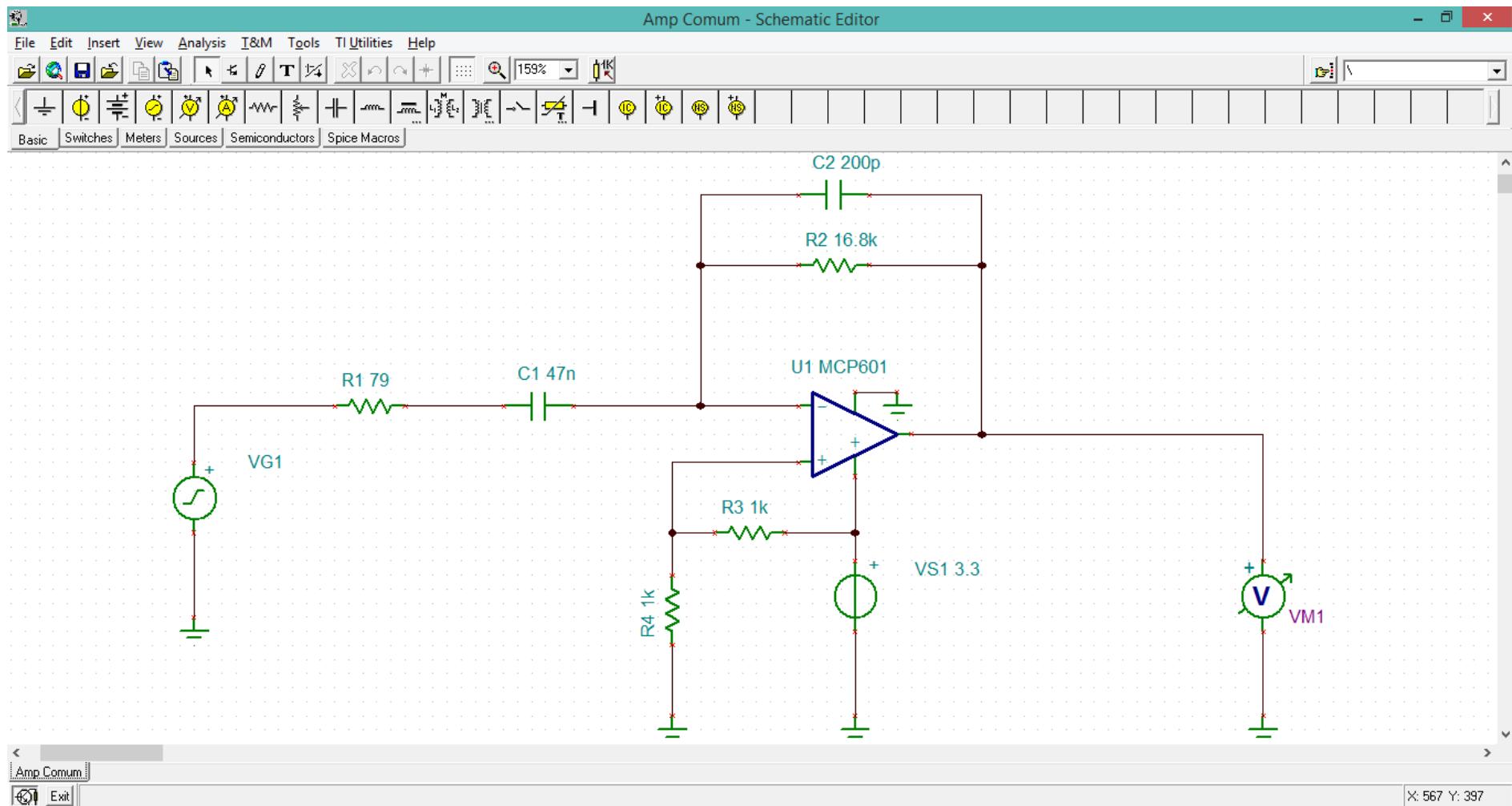


Figura 20 – Simulador de circuitos

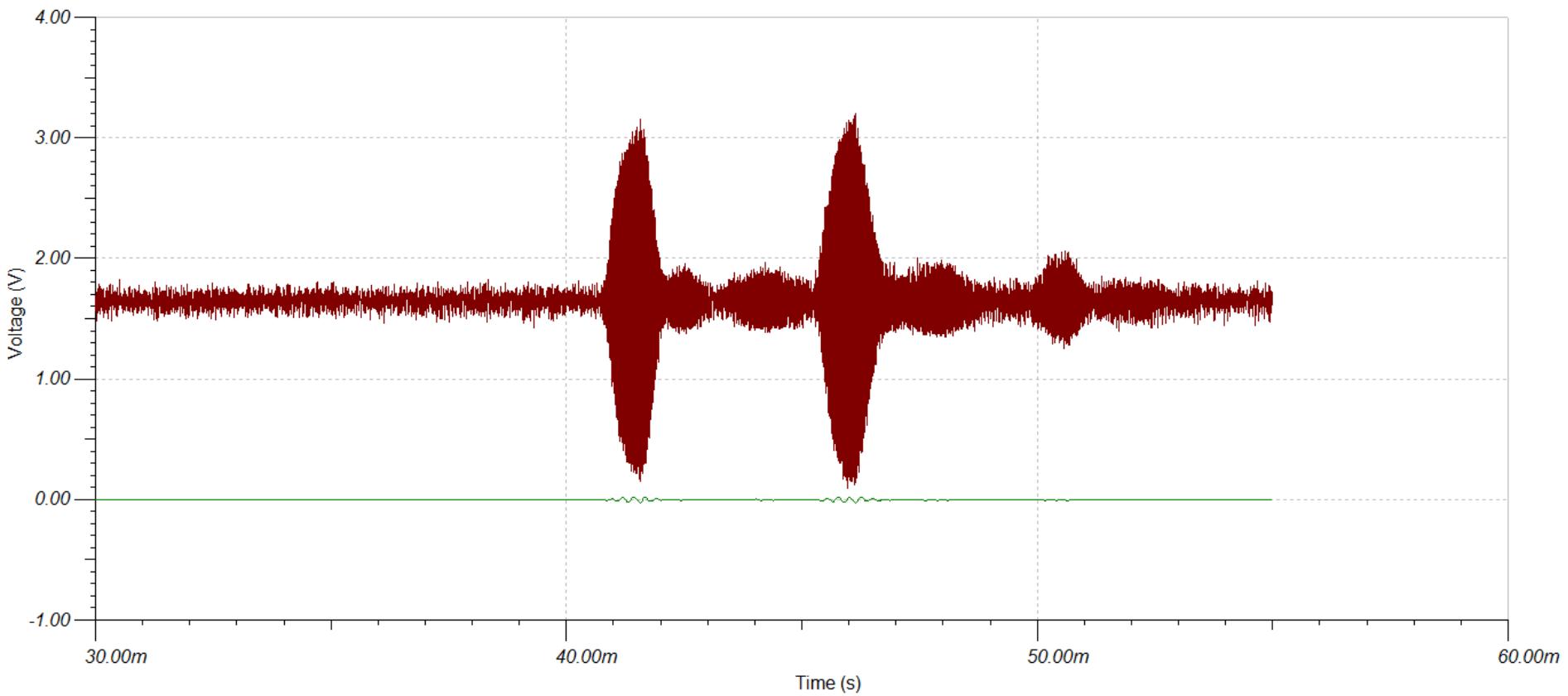


Figura 21 – Resultados da simulação do amplificador

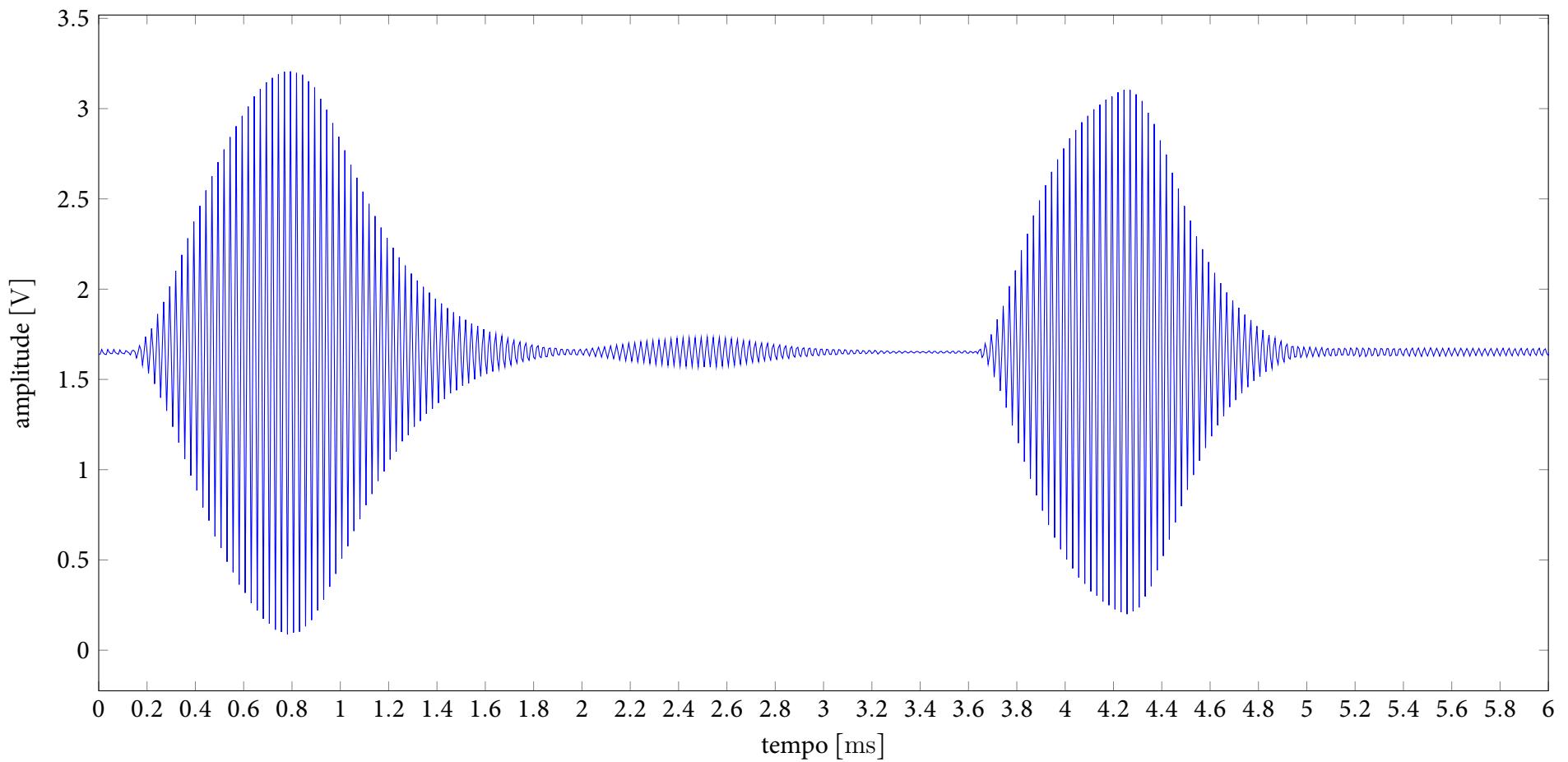


Figura 22 – Exemplo de sinal obtido pelo segundo amplificador

# 6 Testes e validações

Para validar as informações obtidas pelos sensores e módulos que compõem o projeto, foram realizadas observações externas ao circuito, utilizando equipamentos de teste e medição: um osciloscópio e um multímetro.

O osciloscópio utilizado nestes testes é um osciloscópio de interface USB, de 20MHz de largura de banda e taxa de amostragem de 48MS/s, modelo Hantek 6022BE. Este equipamento foi escolhido devido ao seu baixo custo, e embora sua largura de banda seja relativamente baixa, as frequências utilizadas neste projeto são de magnitudes menores, de forma a ser adequado aos experimentos realizados.

Além disso, através do multímetro, foram realizadas medições do consumo de energia, já que este dispositivo é alimentado por baterias, ou seja, este é um parâmetro muito importante para a viabilidade do projeto, pois um consumo muito alto reduziria a autonomia da solução.

## 6.1 Sinal de entrada

O circuito responsável pela captura de sinal dos transdutores e de amplificação é extremamente importante, já que o amplificador trabalha com um alto ganho para adequação aos níveis de sinal do conversor analógico-digital (ADC).

Assim, foram realizadas medições diretamente no transdutor ultrassônico de forma a obter valores base para projetar os amplificadores, como descrito na seção 5.4. A forma de onda é ilustrada na Figura 23.

## 6.2 Frequência de atualização

Foi medido a frequência em que os pulsos são transmitidos, recebidos e a distância entre objetos calculada. Sem nenhuma otimização de software habilitada, foi obtido o valor de aproximadamente 3,5 leituras por segundo, conforme ilustra a Figura 24.

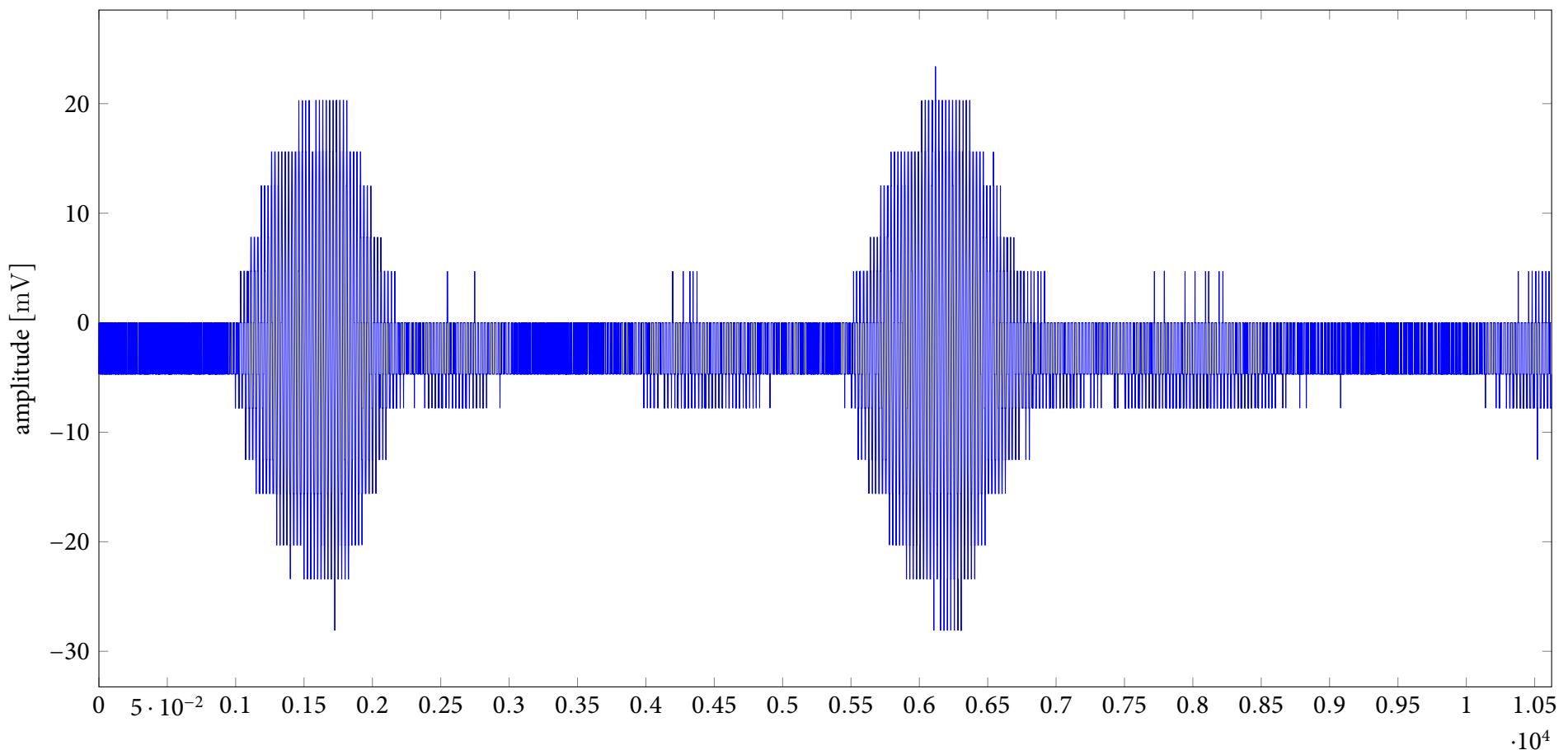


Figura 23 – Sinal recebido pelo transdutor

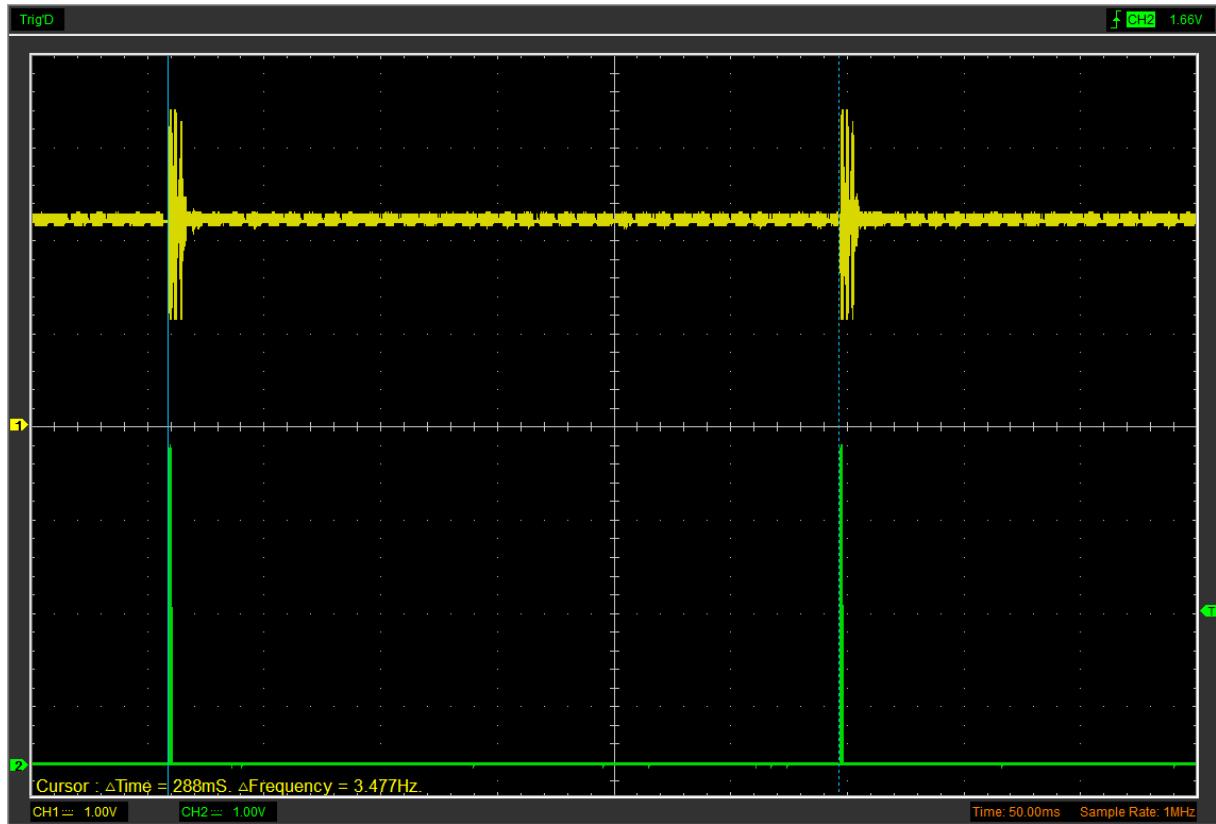


Figura 24 – Frequência de transmissão e processamento da distância

### 6.3 Consumo de energia

Como o projeto tem o objetivo de ser um equipamento portátil e alimentado por baterias, é necessário levar em conta o consumo de energia. Um consumo elevado resulta em baixo tempo de autonomia da bateria, ou então na necessidade de aumentar o tamanho da bateria – duas consequências que inviabilizam o uso cotidiano do dispositivo.

Desta forma, foram realizadas medições em algumas situações para verificar o consumo de energia, conforme a Tabela 2.

Se o dispositivo utilizar uma bateria recarregável de lítio-ion com capacidade de 900mAh para seu fornecimento de energia, o tempo de vida, no pior caso, seria de aproximadamente 38 horas.

O consumo de energia foi mensurado antes e após a alteração no amplificador de entrada. Não houve variações significativas no consumo de energia.

É importante notar que a placa de desenvolvimento utilizada no protótipo possui dois LEDs que ficam acesos enquanto há fornecimento de energia, o que representa um consumo extra de aproximadamente 7,2mA (TEXAS INSTRUMENTS, 2013).

Situação	Consumo (mA)
Frequência de atualização de 1Hz	22,1
Frequência de atualização de 3,5Hz	22,3
Frequência de atualização de 3,5Hz e Bluetooth	23,6
Frequência de atualização de 3,5Hz e Bluetooth - Amplificador novo	23,5

Tabela 2 – Consumo de energia do protótipo em diversas situações



Figura 25 – Medição do consumo de energia

## 6.4 Testes de distância

Para verificar a correta determinação das distâncias até os obstáculos, foram realizadas três medições em campo aberto utilizando para corpo de teste um pilar de 25cm de largura. As distâncias testadas foram de 60, 80 e 120cm. Estes testes são os ilustrados pelas Figuras 26, 27 e 28.

Em seguida, foi realizado novo teste, utilizando uma lata de refrigerante de 6,5cm de

diâmetro, para verificar a viabilidade de determinação de distâncias de obstáculos com pequeno tamanho ou largura. Este obstáculo foi colocado a 50cm de distância do pilar, para que o pilar não interferisse na medição, e a lata de refrigerante a 50cm do módulo sonar. Este teste é ilustrado pela Figura 29. Em todos os testes foram obtidas 450 amostras de distância.

Nos dois primeiros testes, podemos verificar uma diferença média de dois centímetros em relação à distância correta; já no casos do obstáculo mais distante e do obstáculo menor, a diferença é maior: em torno de quatro centímetros. Isso se deve ao fato que o sinal refletido dos pulsos em obstáculos menores e mais distantes é mais fraco, dificultando assim a determinação da distância correta com precisão.

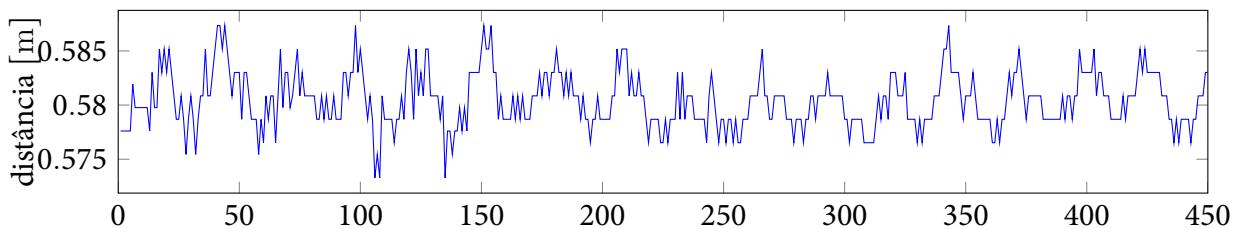


Figura 26 – Obstáculo distante 60cm

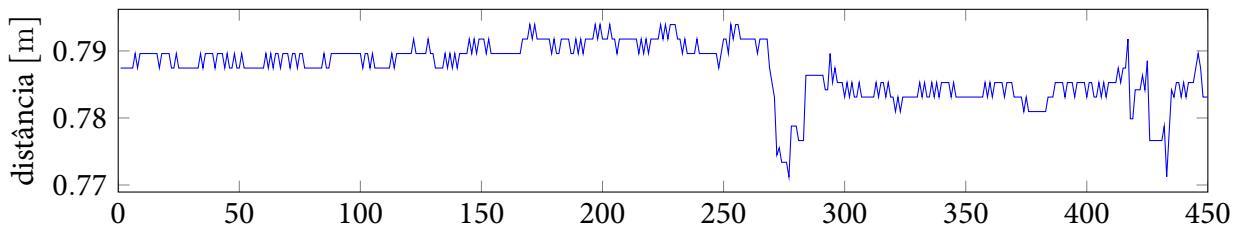


Figura 27 – Obstáculo distante 80cm

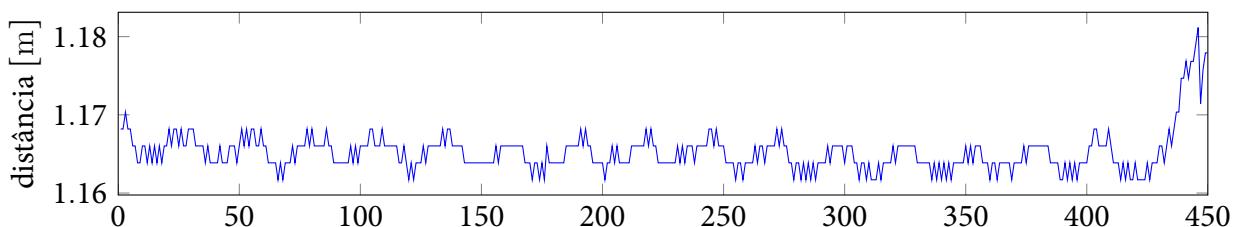


Figura 28 – Obstáculo distante 120cm

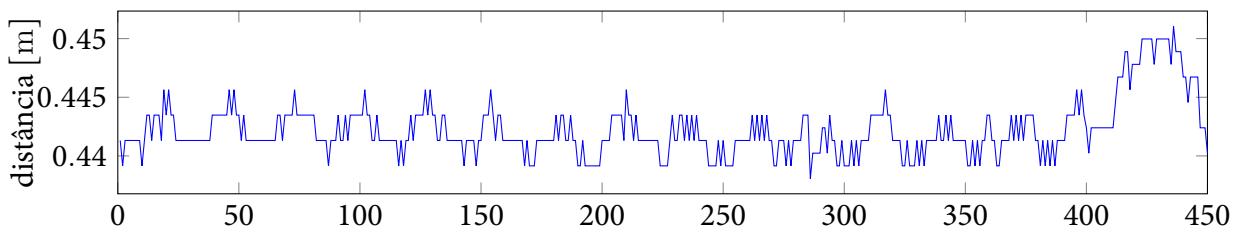


Figura 29 – Pequeno obstáculo distante 50cm



Figura 30 – Medição de distância: obstáculo a 60cm



Figura 31 – Medição de distância: pequeno obstáculo a 50cm

## 7 Conclusões

O módulo sonar do projeto MyPath mostrou ser um protótipo viável para a realização da detecção de obstáculos em ambientes abertos. Embora os resultados tenham apresentado uma imprecisão, que varia entre dois e quatro centímetros entre a distância real do obstáculo e a informada ao usuário, isto não se torna um impedimento para atingir o objetivo proposto neste trabalho, pois esta variação reduz conforme a distância entre usuário e obstáculo diminui.

Durante o desenvolvimento da solução, foi notado que devido a atualizações no sistema operacional do *smartphone*, o acesso a API de Bluetooth foi modificado, desta forma foi necessário adequar o aplicativo para esta alteração. Isso não alterou o comportamento do módulo sonar, mas o aplicativo deve sempre ser testado a cada atualização de sistema operacional para garantir o funcionamento correto do MyPath.

Outras melhorias que podem ser realizadas são o aumento de número de sensores ultrassônicos de recepção para permitir a detecção de obstáculos em outras direções, construção de uma placa de circuito customizada com o uso de componentes de montagem em superfície, o que remove a necessidade de uso de uma placa de desenvolvimento como base, ou até mesmo a especificação de um microcontrolador ou microprocessador mais poderoso para remover a dependência do *smartphone*, a fim de construir um produto independente.



# Referências

- BLUETOOTH SIG. *Bluetooth Specification version 1.1: Part K:5 – Serial Port Profile*. Kirkland, WA, 2001. 25
- BROOKER, G. *Introduction to Sensors for Ranging and Imaging*. Stevenage: Institution of Engineering and Technology, 2009. ISBN 9781891121746. 17
- BUENO, A. C. Bengala eletrônica para deficientes visuais. 2010. 17, 21
- CURTIS, K. Ultrasonic range detection. *Microchip Application Note AN1536*, Microchip Technology, Inc., 2013. 19, 21
- ESCUDERO JR., E. J.; RAI, G. S. An investigation into ultrasonic communication for near-body networks. 2011. 17
- FEYNMAN, R. P. *The Feynman lectures on physics: new millennium edition*. New York, NY, USA: Basic Books, 2010. ISBN 0-465-02414-9. Disponível em: <<http://feynmanlectures.caltech.edu/>>. Acesso em: 22 maio. 2014. 21
- GUANGZHOU HC INFORMATION TECHNOLOGY CO., LTD. *HC-05 Module Data Sheet*. Guangzhou, 2011. Disponível em: <<http://silabs.org.ua/bc4/hc05.pdf>>. Acesso em: 25 janeiro. 2014. 25
- HAYKIN, S.; MOHER, M. *Sistemas de Comunicação*. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2011. 33
- HEALE, A.; KLEEMAN, L. A real time dsp sonar echo processor. In: *IN PROCEEDINGS OF THE IEEE/RSJ INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT ROBOTS AND SYSTEMS*. [S.l.: s.n.], 2000. p. 1261–1266. 17
- HOSANGADI, P. *Speed of sound at temperatures below 0°C*. 2014. Physics Stack Exchange. Disponível em: <<http://physics.stackexchange.com/q/98656>>. Acesso em: 22 maio. 2014. 21
- KAY, L. Ultrasonic eyeglasses for the blind. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Acoustical Society of America, v. 108, n. 5, p. 2514–2514, 2000. 17, 21
- KUGELSTADT, T. Active filter design techniques. In: \_\_\_\_\_. *Op Amps for Everyone*. Dallas, TX: Texas Instruments, 2001. cap. 16. 24
- MASUDA, G.; ZHANG, X. Ultrasonic security system. 2012. Disponível em: <[http://people.ece.cornell.edu/land/courses/ece4760/FinalProjects/s2012/xz227\\_gm348/xz227\\_gm348/](http://people.ece.cornell.edu/land/courses/ece4760/FinalProjects/s2012/xz227_gm348/xz227_gm348/)>. 17
- NAJMABADI, F. *ECE60L Lecture Notes*. San Diego: University of California San Diego, 2003. Disponível em: <<http://aries.ucsd.edu/najmabadi/CLASS/ECE60L/03-S/NOTES/index.shtml>>. Acesso em: 20 maio. 2014. 37
- NIPPON CERAMIC CO., LTD. *Ultrasonic Transducer Specification - Model No. AT/R40-10P*. [S.l.], 2001. Disponível em: <<http://www.komantech.com/download/ATR40-10P.pdf>>. Acesso em: 12 novembro. 2013. 24
- RAJU, M. Ultrasonic distance measurement with the MSP430. *Texas Instruments Application Report SLAA136A*, Texas Instruments, Inc., 2001. 24

REIS, J. M. de M. Técnicas de sonar para detecção de obstáculos em navegação. 1999. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10216/12328>>. 17

SMITH, S. W. *The scientist and engineer's guide to digital signal processing*. San Diego, CA, USA: California Technical Publishing, 1997. ISBN 0-9660176-3-3. 26, 33, 37

TEXAS INSTRUMENTS. *Stellaris LM4F120 LaunchPad Evaluation Board Users Manual*. [S.l.], 2013. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ug/spmu289c/spmu289c.pdf>>. Acesso em: 09 novembro. 2013. 47

TEXAS INSTRUMENTS. *Tiva TM4C1233H6PM Microcontroller Data Sheet*. [S.l.], 2014. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tm4c1233h6pm.pdf>>. Acesso em: 28 junho. 2014. 24, 27

TIPPENS, P. *Física: conceptos y aplicaciones*. 7. ed. México, D.F.: McGraw Hill/Interamericana Editores, 2007. 21

VIEIRA, A. D. MyPath: Auxílio para o deslocamento de deficientes visuais. Bauru, 2014. 17, 19

WILLS, J. *Electric Boogaloo: The writeup 2*. 2012. Disponível em: <<http://euphonistihack.blogspot.com.br/2012/12/the-writeup-2-electric-boogaloo.html>>. Acesso em: 22 maio. 2014. 32