



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

RAYANA CARVALHO DE BARROS SOUTO

**Metodologia de Medição da Distância utilizando
Transdutores Ultrassônicos baseado na Transformada
Wavelet**

JOÃO PESSOA, PB

Dezembro de 2021

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Metodologia de Medição da Distância utilizando Transdutores Ultrassônicos baseado na Transformada Wavelet

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação de Engenharia Elétrica da UFPB como um dos pré-requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Juan Moises Mauricio Villanueva

JOÃO PESSOA, PB

Dezembro de 2021

RAYANA CARVALHO DE BARROS SOUTO

Metodologia de Medição da Distância utilizando Transdutores Ultrassônicos baseado na Transformada Wavelet

Trabalho de Conclusão de Curso Submetido à Coordenação de Engenharia Elétrica como parte dos requisitos necessários para à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica

Aprovado pela Banca Examinadora em: 03 / 12 / 2021

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Juan Moisés Maurício Villanueva (Orientador)

Universidade Federal da Paraíba (UFPB)



Prof. Dr. Cícero da Rocha Souto (Avaliador)

Universidade Federal da Paraíba (UFPB)



Prof. Dr. Waslon Terlizzie Araújo Lopes (Avaliador)

Universidade Federal da Paraíba (UFPB)

JOÃO PESSOA, PB

DEZEMBRO, 2021

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

S728m Souto, Rayana Carvalho de Barros.

Metodologia de Medição da Distância utilizando Transdutores Ultrassônicos
baseado na Transformada Wavelet / Rayana Carvalho de Barros Souto. - João
Pessoa, 2021.

71 f. : il.

Orientação: Juan Moises Mauricio Villanueva Villanueva.

TCC (Graduação) - UFPB/CEAR.

UFPB/BSCT

CDU 621.3 (043.2)

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, por ter estado presente em todos os momentos, por ter me acompanhado em cada passo dado até chegar aqui.

Agradeço à minha mãe, Marluce Carvalho Pereira, pelo apoio incondicional, pelo carinho, amor e compreensão que sempre teve comigo, além dos ensinamentos que vou levar ao longo de toda minha vida e por sempre me mostrar que a educação é o melhor caminho para se obter sucesso.

Agradeço aos meus tios Maria do Rosário e Antônio pela paciência e ajuda que sempre foram preciosos para mim.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Juan Moises Mauricio Villanueva por todo apoio, paciência, disponibilidade e orientações valiosas que me ajudaram, não só ao longo da confecção deste trabalho, como também ensinamentos que levarei ao longo da minha vida.

Gostaria de agradecer ao Prof. Dr. Antônio Augusto pelo apoio durante minha Iniciação Científica.

Agradeço ao Prof. Dr. Lucas Hartmann por todo o apoio como orientador de estágio durante esses três longos anos.

Agradeço ao Prof. Dr. Euler Macedo por todos os ensinamentos que contribuíram muito na minha formação profissional.

Agradeço ao Prof. Dr. Alessandro pelo seu grande amor aos alunos e pela sua paciência durante o curso, principalmente nas disciplinas que ministra.

Agradeço ao Prof. Dr. Rogério pela sua paixão em lecionar, que foi o que me fez entender a disciplina de Sistemas Elétricos.

Agradeço à banca examinadora deste trabalho, composta pelo Prof. Dr. Waslon T. A. Lopes e pelo Prof. Dr. Cícero R. Souto. Bem como, a todo corpo docente do departamento de Engenharia Elétrica por todo seu trabalho e dedicação.

Por fim, gostaria de agradecer aos meus amigos que a engenharia elétrica me presenteou, em especial a Maria Carolina, Lamarck, Marcella, Luan, Sharon e Zacarias. Aos meus amigos de infância Stefany, Franci, David e Priscila. Aos meus amigos que o curso de Física me proporcionou em especial a Renan, Victor e Thommas.

“Considere seus fracassos parte do processo.

Isso faz parte da sua jornada ao sucesso.”

(Run On)

“Meu querido futuro, está tudo bem se você não

saiu do jeito que eu queria,

porque ainda sou aquela que

mais ama e torce por você.”

(Hello, me!)

Resumo

Nas últimas décadas, a transformada Wavelet tem sido satisfatoriamente aplicada a sinais de características não-estacionárias. Sua aplicação se destaca em diferentes áreas como Engenharia, Física, Matemática, entre outras. A transformada Wavelet pode ser utilmente empregada para a remoção do ruído em sinais (denoising) e para a extração de padrões e imagens. A medição da distância tem relevância em aplicações industriais e científicas, e pode ser mesurada com diversos princípios de medição, mas quando a precisão for requerida, transdutores ultrassônicos fornecem soluções com baixa incerteza de medição. Neste trabalho de conclusão de curso, tem-se como objetivo projetar e modelar um sistema de medição de distância utilizando transdutores ultrassônicos, cujo princípio de estimação da distância baseia-se na medição do tempo de trânsito. Neste trabalho o tempo de trânsito foi medido utilizando duas técnicas: a) Detecção de Limiar; b) Detecção de Limiar com Denoising utilizando a Transformada Wavelet. Os resultados foram obtidos por meio de simulações computacionais utilizando o programa MATLAB/Simulink, em que foi modelado os transdutores ultrassônicos, ruído de medição, e realizado análise de incertezas para verificar a confiabilidade e exatidão das técnicas, tanto da detecção de limiar e da transformada Wavelet. A partir dos resultados, foi observada a limitação no uso da técnica de detecção de limiar para nível do desvio padrão do ruído acima de 0,04. Utilizando a técnica de limiar com denoising baseada na transformada Wavelet este problema foi solucionado, conseguindo-se ter um resultado satisfatório.

Palavras-chave

Tempo de Trânsito, Transformada Wavelet, Detecção de Limiar, Transdutores Ultrassonicos.

Abstract

In recent decades, the Wavelet transform has been satisfactorily applied to signals with non-stationary characteristics. Its application stands out in different areas such as Engineering, Physics, Mathematics, and others. The Wavelet transform can successfully remove the noise in signals (denoising) and pattern and image extraction. Distance measurement has relevance for industrial and scientific applications, and there are several measurement principles, but when accuracy is required, ultrasonic transducers provide solutions with low measurement uncertainty. In this final paper, the target is designing and modeling a distance measurement system using ultrasonic transducers, whose distance estimation principle is based on the transit time measurement. The transit time was measured using two techniques: a) Threshold detection; b) Threshold detection with Denoising using the Wavelet Transform. The results were obtained through computer simulations using the MATLAB/Simulink software, which allowed modeling the ultrasonic transducers, measurement noise, and uncertainty analysis to verify the reliability and accuracy of the techniques, both threshold detection, and Wavelet transform. From the results, a limitation in the use of the threshold detection technique for noise standard deviation levels above 0.04 was observed. This problem was solved by Using the threshold detection technique with denoising based on the Wavelet transform, achieving a satisfactory result.

Keywords

Time of Flight, Wavelet Transform, Threshold Detection, Ultrasonic Transducers.

Lista de Figuras

Figura 1 - Visão Geral do funcionamento do transdutor ultrassônico	18
Figura 2 - Sensor Ultrassônico - TCT40-16R/t.....	20
Figura 3 - Sensor Ultrassônico Um 18	20
Figura 4 - Estrutura do sensor ultrassônico	22
Figura 5 – Banco de filtros simples, S é o sinal original, D detalhe e A aproximação ...	24
Figura 6 – Exemplo do sinal passando por dois filtros.....	25
Figura 7 – Filtragem no nível mais simples, S é o sinal original, cD é o coeficiente de e detalhe e cA é o coeficiente de aproximação	26
Figura 8 – Árvore de decomposição Wavelet	26
Figura 9 – Reconstrução dos coeficientes do sinal	27
Figura 10 – Processo de alongamento através da inserção de zeros entre amostras	27
Figura 11 – Fases de decomposição e reconstrução do sinal	28
Figura 12 – Reconstrução dos coeficientes de detalhe e de aproximação	28
Figura 13 – Reconstrução de aproximação do primeiro nível.....	29
Figura 14 – Processo de reconstrução do coeficiente de detalhe	29
Figura 15 – Componentes de sinal reconstruídos	30
Figura 16 – Ilustração da Wavetet de Haar	31
Figura 17 – Wavelet Ψ do tipo Daubechies	32
Figura 18 – Wavelet Ψ do tipo Biortogonais	33
Figura 19 – Wavelet Ψ do tipo Coiflet.....	33
Figura 20 – Wavelet Ψ do tipo Symlet.....	34
Figura 21 – Wavelet de Morlet com valor real	34
Figura 22 – Wavelet de Morlet de valor complexo	34
Figura 23 – Fluxograma dos métodos para a estimação da distância	36
Figura 24 – Medição do ToF utilizando a técnica de Detecção de Limiar	37
Figura 25 – Modelo de medição ToF usando a Transformada Wavelet	38
Figura 26 - Medição da distância em relação ao ToF.....	40
Figura 27 - Diagrama de blocos do sistema de medição baseado em ultrassom	44
Figura 28 - Bloco responsável por gerar onda senoidal de 40 KHz.....	45
Figura 29 - Forma de onda senoidal de 40 KHz	45
Figura 30 - Bloco responsável por gerar o atraso ToF.....	46
Figura 31 - Conjunto de blocos responsável pela recepção do sinal.....	46

Figura 32 - Sinal recebido no transdutor receptor.....	47
Figura 33 - Para um ruído = 0.0001	48
Figura 34 - Para um ruído = 0.04	49
Figura 35 - Para um ruído = 0.005	49
Figura 36 - Resultado de simulação no Matlab sem a presença de ruído	50
Figura 37 - Para um ruído = 0.0001	51
Figura 38 - Para um ruído = 0.005	51
Figura 39 - Para um ruído = 0.04	51
Figura 40 - Resultado no Matlab sem a presença de ruído.....	52
Figura 41 - Para um ruído = 0.0001	53
Figura 42 - Para um ruído = 0.005	53
Figura 43 - Para um ruído = 0.04	54
Figura 44 - Resultado da simulação sem a presença de ruído	54
Figura 45 - Ilustração do aplicativo no Matlab.....	55
Figura 46 - Aplicativo Analyzer Wavelet.....	55
Figura 47 - Carregamento da variável no aplicativo.....	56
Figura 48 - Família db6 com 3 níveis	56
Figura 49 - Exportando os coeficientes.....	57
Figura 50 - Com ruído = 0.04.....	58
Figura 51 - Com ruído = 0.07.....	58
Figura 52 - Para um ruído = 0.1	59
Figura 53 - Para um ruído = 0.04	60
Figura 54 - Para um ruído = 0.07	60
Figura 55 - Para um ruído = 0.1	60
Figura 56 - Com ruído = 0.04.....	61
Figura 57 - Com ruído = 0.07.....	62
Figura 58 - Com ruído = 0.1.....	62

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Comparação entre as técnicas baseadas no método de Tempo de Trânsito ..	40
Tabela 2 – Tempo de Trânsito para uma distância de 0.25 m	50
Tabela 3 - Tempo de Trânsito para uma distância de 0.5 m.....	52
Tabela 4 - Tempo de Trânsito para a distância de 1 m	54
Tabela 5 - Estimção da distância para a Detecção de Limiar e Transformada Wavelet para uma distância de 0.25m.....	59
Tabela 6 - Distância para o método da Detecção de Limiar e da Transformada Wavelet para uma distância teórica de 0.5 m	61
Tabela 7 - Distância para o Método da Detecção de Limiar e da Transformada Wavelet para uma distância teórica de 1 m.....	62

Sumário

1. Introdução.....	14
1.1 Objetivos.....	16
1.2 Estrutura do trabalho	17
2. Fundamentação Teórica.....	18
2.1 Cenário de Medição.....	18
2.2 Transdutores Ultrassônicos	19
2.3 Transformada Wavelet	22
2.4 Famílias da Transformada Wavelet.....	31
2.4.1 Wavelet Haar	31
2.4.2 Wavelet Daubechies	31
2.4.3 Wavelet Biortogonais	32
2.4.4 Wavelet Coiflets	33
2.4.5 Wavelet Symlets	33
2.4.6 Wavelet de Morlet	34
2.4.7 Wavelet de Meyer.....	34
2.4.8 Escolhendo a Família Wavelet	35
3. Metodologia	36
3.1 Estimação do ToF usando a Detecção de Limiar.....	36
3.2 Estimação do ToF usando a Transformada Wavelet	38
3.3 Estimação indireta da distância usando o ToF.....	39
3.4 Comparação dos Métodos de ToF.....	40
4. Resultados	42
4.1 Cenário de Simulação.....	42
4.2 Modelagem de Simulação em Matlab/Simulink.....	43
4.3 Resultados de simulação usando o método da Detecção de Limiar	47
4.4 Resultados do método da Detecção de Limiar utilizando a Transformada Wavelet	55
5. Conclusões e Trabalhos Futuros.....	64
5.1 Conclusões.....	64
5.2 Trabalhos Futuros	64
Referências	65
ANEXOS.....	67
ANEXO A – Estrutura do projeto das placas.....	67
ANEXO A 1 – Estágio 1: Oscilador 40 KHz	68

ANEXO A 2 – Estágio 2: Amplificador push-pull	68
ANEXO A 3 – Estágio 3: Filtro passa-faixa	69
ANEXO A 4 - Estágio 4: Filtro passa-baixa + comparador	70
ANEXO A 5 – Estágio 5: Porta AND	71
ANEXO A 6 – Estágio 6: Filtro passa-baixa.....	71

1. Introdução

Transdutor é um dispositivo que converte um tipo de energia em outra. Os transdutores ultrassônicos convertem energia elétrica em mecânica e vice-versa e é um dispositivo utilizado em medição que fornece uma saída que condiz com a entrada. Independentemente do tipo de sensor a ser utilizado, na instrumentação sempre se tem o objetivo de fornecer medições confiáveis e precisas. Para atingir tais objetivos, grande parte da responsabilidade reside no tratamento de dados, na metodologia aplicada nos dados coletados para fornecer bons resultados. Nesta linha de raciocínio, uma técnica consolidada consiste na utilização de sensores em redundância permitindo a aplicação de técnicas de estimação de medições baseadas em fusão de dados.

O transdutor transmissor transforma um sinal elétrico em uma onda de pressão acústica. Já na recepção uma pressão acústica provoca alterações na forma física do transdutor receptor, modificando o sinal elétrico. Esses transdutores são feitos de materiais piezoelétricos que apresentam um fenômeno chamado *efeito piezoelétrico*.

Métodos de medição utilizando transdutores ultrassônicos são baseados no tempo de trânsito (ToF, do inglês *Time-of-Flight*) e na velocidade de propagação de qualquer substância, em suspensão e com impedância acústica diferente ao fluido que ecoa, que pode atuar como refletor e altera a frequência do sinal de ultrassom (Doppler), (PÁLLAS-AREMY; WEBSTER, 2001). Este trabalho possui o interesse de realizar medições da distância utilizando-se apenas o método de Tempo de Trânsito.

Nas últimas décadas, sistemas de medição da distância baseado em técnicas ultrassônicas evoluíram rapidamente, fazendo uso de tecnologias avançadas para a fabricação de transdutores ultrassônicos, de técnicas de processamento de sinais e de estudos para a análise e propagação de incertezas. Os transdutores ultrassônicos são utilizados para fins industriais, médicos e ensaios destrutivos. As características relevantes observadas são: a frequência e impedâncias nominais, sensibilidade, nível de pressão de som, largura de banda e a diretividade ou ângulo de irradiação.

A problemática para se usar os transdutores ultrassônicos é que qualquer ruído acústico irá afetar a amplitude do sinal o que interfere no desempenho do sensor. Isso inclui ruídos de alta frequência e também pode ter interferência acústica se posicionar dois sensores ultrassônicos na mesma frequência próximos.

A flutuação da temperatura afeta a velocidade das ondas sonoras de um sensor ultrassônico. À medida que a temperatura aumenta, as ondas de som partem e retornam mais rápido do alvo. Embora o alvo não tenha mudado, para o sensor parecerá que o alvo estará mais próximo. As correntes de ar causadas por equipamentos pneumáticos ou ventiladores também podem desviar ou perturbar o caminho da onda ultrassônica. Isso pode levar um sensor a não reconhecer a localização correta de um alvo.

Os sensores ultrassônicos funcionam medindo o tempo de propagação do eco, isto é, o intervalo de tempo entre o impulso sonoro emitido e o eco recebido de volta.

Em (INGAROCA, 2011) foi desenvolvido um método de medição de fluidos multiníveis, baseado na detecção de eco ultrassônica por meio da transformada Wavelet (WT). A Transformada Wavelet fornece uma ferramenta para analisar a evolução da frequência temporal dos sinais transitórios. Isto destaca o excelente desempenho mostrado pelo WT como uma poderosa ferramenta para a análise de ecos em um ambiente ruidoso. Além disso em (INGAROCA, 2012) foi desenvolvido um método para medir a velocidade do vento, a partir da detecção de eco utilizando transdutores ultrassônicos com onda estacionária transformado é apresentado. A transformada Wavelet estacionária (SWT) pode ser obtido através da modificação do esquema básico de transformada Wavelet discreta (DWT). Dois filtros são aplicados para produzir a produzir duas seqüências em cada nível, que após a obtenção dos coeficientes SWT, a remoção do ruído será realizada utilizando a regra do limiar suave devido aos coeficientes ainda incluem os efeitos do ruído. A influência das incertezas associadas ao ruído aditivo e atenuação do sinal ultrassônico sobre a velocidade do vento a incerteza de medição é analisada.

Em sistemas de medição ultrassônica de curto alcance, a área cega da medição limita a aplicação dos transdutores ultrassônicos de baixo custo. Em um sistema de medição de transdutor duplo, quando os impulsos são carregados para o transmissor com reflexão e refração do sônico, o receptor próximo receberá ecos imediatamente, o que levará a um período de tempo que não pode ser medido. Se um objeto estiver perto do transdutor, o receptor obtém uma reflexão de ecos mais forte do objeto do que a reflexão e a refração do transmissor. Ao distinguir a amplitude das ondas de eco em uma área cega, descobrimos a distância entre o objeto e o transdutor (LIU,2016).

A estimação do ToF pode ser aprimorada utilizando-se métodos híbridos como as técnicas de correlação e a técnica de diferença de fase entre o transmissor e receptor (KHYAM, 2017). A medição de distância baseado em transdutores ultrassônicos requerem realizar a medição da velocidade do som. Entretanto as variações não uniformes

da temperatura alteram a medição da velocidade do som e, portanto, aumentam a incerteza da medição da distância, limitando o uso de transdutores ultrassônicos para pequenas distâncias.

Em (LUCENA, 2020) foi desenvolvida técnicas baseadas na diferença de tempo e processamento de sinal têm sido usadas para estimativa de tempo de trânsito a fim de reduzir incertezas. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma nova metodologia para estimativa do tempo de voo com sinais de ultrassom para medição da velocidade do vento. O método proposto, baseado no filtro de Kalman estendido, utiliza um modelo para medição indireta do tempo de voo, por meio de medições da amplitude do sinal do transdutor receptor. Além disso em (LUCENA, 2017) foi publicado um artigo que apresenta algumas considerações sobre incerteza e ruído relacionados aos transdutores ultrassônicos na estimativa do tempo de voo para medição da velocidade do vento com modo de transmissão pulsado.

Em (YOSHIKAWA, 2021), foi desenvolvido um sistema de medição de distância em ambiente com altos níveis de interferência utilizando arranjos de sensores ultrassônicos. Para a estimação do ToF foram usados algoritmos de aprendizagem de máquina (*Machine Learning*), tendo como resultado uma faixa de medição de 4–12.5 m \pm 5 cm. Entretanto, este método utilizou como estudo de caso, a detecção de objetos estáticos, isto é, não estavam em movimento.

1.1 Objetivos

O objetivo desse trabalho é desenvolver um sistema de medição de nível composto por sensores ultrassônicos, utilizando a técnica de detecção de limiar e transformada Wavelet para estimação da distância.

Objetivos específicos:

- Desenvolver um procedimento de estimação da distância utilizando transdutores ultrassônicos baseado na Transformada Wavelet.
- Realizar um estudo teórico e de simulação sobre as aplicações da TW para a filtragem do ruído em sinais de ultrassom.
- Comparação de técnicas de detecção de limiar e transformada Wavelet para avaliar a robustez da metodologia proposta.
- Apresentar os resultados de simulação do procedimento de medição da distância baseado na TW.

1.2 Estrutura do trabalho

Além do capítulo de introdução, este trabalho está construído por mais 04 (quatro) capítulos:

Capítulo 2 – Fundamentação Teórica. Será abordado conceitos relacionados à sensores ultrassônicos, método de estimação do ToF nas técnicas da Detecção de Limiar e da Transformada Wavelet. Com relação aos transdutores ultrassônicos, descreve-se o princípio de funcionamento e suas características.

Capítulo 3 – Metodologia. Abordará a metodologia utilizada, dando continuidade a revisão bibliográfica acerca das técnicas utilizadas para a determinação do Tempo de Trânsito (*ToF*).

Capítulo 4 – Resultados. Sistema de Medição, simulações e estudo comparativo dos métodos. Aponta-se qual o método mais adequado e compara-se os resultados obtidos.

Capítulo 5 – Conclusão. Nesse capítulo será abordado as conclusões e propostas de futuros trabalhos. Neste ponto do trabalho, serão destacados os principais resultados e os trabalhos futuros que poderão ser realizados.

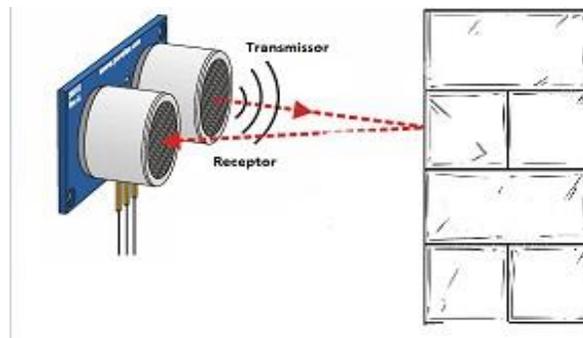
2. Fundamentação Teórica

Nesta seção são apresentados brevemente os fundamentos teóricos sobre o cenário de medição, transdutores ultrassônicos, método de estimação do ToF e a Transformada Wavelet.

2.1 Cenário de Medição

Sensores ultrassônicos emitem pulsos ultrassônicos que é baseado na estimação de tempo entre o eco do pulso transmitido até a detecção do mesmo no receptor. Essa diferença de tempo é chamada de tempo de trânsito (*Time of Flight – ToF*) e é muito utilizado para medição de distância por ultrassom e usualmente é implementada utilizando técnica de detecção de limiar. A técnica de limiar realiza a detecção do eco no transdutor receptor ultrassônico e o método de correlação aprimora a estimação do ToF com poucas amostras, aprimorando-se assim, o custo computacional e a necessidade de hardware específicos para processamento de sinais. Essa técnica de limiar apresenta limitações em ambientes com altos níveis de ruído (HITARA,2017). A estimação do ToF pode ser aprimorada utilizando-se métodos híbridos como as técnicas de correlação e a técnica de diferença de fase entre o transmissor e receptor (KHYAM, 2017).

Figura 1 - Visão Geral do funcionamento do transdutor ultrassônico



Fonte: Adaptado de Anjos, G. T. O.

Analisando a Figura 1 se observa o princípio do funcionamento do sensor ultrassônico, onde o transmissor (Tx) do sensor envia sinais ultrassônicos, e neste momento o receptor (Rx) do sensor fica no estado de “alerta” esperando receber o sinal de retorno, que na verdade é o próprio sinal transmitido, e com base no tempo de trânsito

(ToF) entre o envio do sinal e o retorno do mesmo, então é calculada a distância entre o sensor e o objeto detectado.

A medição de apenas um nível é realizada utilizando-se a técnica do tempo de trânsito (*Time of Flight* – ToF), que é o tempo decorrido entre a transmissão e recepção de um sinal. Esse tempo pode ser obtido de várias maneiras, as duas mais conhecidas são por emissão contínua de uma onda ou por eco de pulso. Quando de maneira contínua, o Tempo de Trânsito é determinado pela diferença de fase entre o sinal emitido continuamente e o recebido. A partir da medição do tempo de trânsito utilizando os sensores ultrassônicos, pode ser estimada indiretamente a distância entre o dispositivo ultrassônico e o objeto em estudo. A distância pode ser calculada por meio da seguinte equação:

$$L = \frac{1}{2} * C * t_{ToF} \quad (1)$$

em que: L é a distância entre a fonte e o nível, C é a velocidade do som e t_{ToF} é o tempo de trânsito. A dependência de C com a temperatura em Celsius $T_{°C}$ é dada por:

$$C = 20.074\sqrt{273.15 + T_{°C}} \quad (2)$$

No entanto, a estimativa do tempo de trânsito (ToF) requer consideração das influências ambientais, tais como a atenuação, ruído aditivo, ruído multiplicativo, o que diminui o SNR da medição, produzindo uma elevada incerteza medição. Conseqüentemente, requer um método de medição para obter a estimativa ToF com precisão suficiente, de modo a ter uma estimativa da qualidade e confiabilidade das medições.

A estimação do ToF pode ser aprimorada utilizando-se métodos híbridos como as técnicas de correlação e a técnica de diferença de fase entre o transmissor e receptor (KHYAM, 2017). As principais técnicas encontradas para a medição do ToF são:

- Detecção de Limiar
- Diferença de fase
- Transformada Wavelet
- Correlação Cruzada
- Filtro de Kalman
- Fusão de Dados

2.2 Transdutores Ultrassônicos

Transdutores ultrassônicos são dispositivos que transformam um tipo de energia em ondas de ultrassom (transmissor) ou o recíproco (receptor). As ondas ultrassônicas são geradas e introduzidas no meio de propagação através de um transdutor transmissor que transforma um sinal elétrico em uma onda de pressão acústica, ao passo que na recepção uma pressão acústica provoca alterações na forma física do transdutor receptor, modificando o sinal elétrico. Este efeito é chamado de piezoelectricidade que é a eletricidade devido à pressão (HELLIER, 2001).

Existem vários tipos de transdutores de ultrassom, dentre eles o piezoelétrico, magnetostritivo, capacitivo e eletromagnético. O mais utilizado e de maior praticidade é o transdutor piezoelétrico, devido a ampla faixa de frequências de operação, e possibilidade de operar em até dezenas de MHz de frequência. Nas Figuras 2 e 3 são apresentados modelos de transdutores ultrassônicos presentes no mercado.

Figura 2 - Sensor Ultrassônico - TCT40-16R/t



Figura 3 - Sensor Ultrassônico Um 18



O transdutor piezoelétrico possui frequência de ressonância maior que a frequência mais alta audível pelo ser humano. O efeito piezoelétrico é fundamental para o desenvolvimento das ondas ultrassônicas e consiste na capacidade de alguns cristais gerarem corrente elétrica por resposta a uma pressão mecânica. O contrário, também ocorre, quando é aplicada ao cristal uma pressão mecânica ele a transforma em corrente elétrica.

O efeito piezoelétrico foi descoberto pelos irmãos Pierre e Jacques Curie na França, em 1880, o efeito piezoelétrico é apresentado em cristais. Os irmãos Curie, no entanto, não previram o efeito piezoelétrico inverso, esse efeito inverso foi matematicamente deduzido de princípios fundamentais da termodinâmica por Gabriel Lippmann em 1881. Os Curie imediatamente confirmaram a existência do efeito inverso,

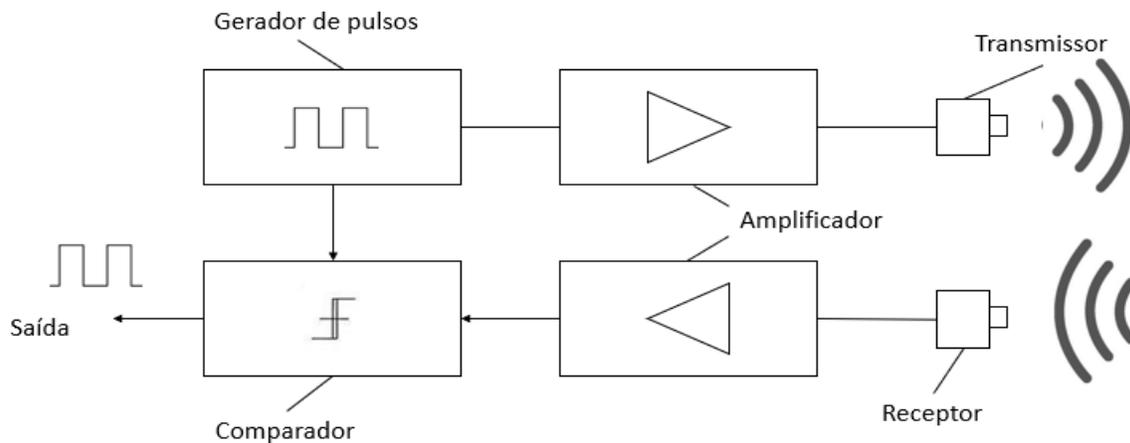
o que evidenciou de forma quantitativa a reversibilidade completa de um acoplamento eletromecânico para as deformações em cristais piezelétricos. Nas décadas seguintes, a piezoeletricidade permaneceu como sendo uma curiosidade de laboratório. Mais trabalho foi feito para explorar e definir as estruturas cristalinas que tinham a propriedade de gerar corrente elétrica. Isso culminou no ano de 1910, com a publicação do livro de Woldemar Voigt *Lehrbuch der Kristallphysik* (Textbook no Crystal Física), que descreve 20 classes de cristais naturais capazes de gerar corrente quando submetidos a pressão mecânica, e rigorosamente definidas as constantes piezoelétricas usando análise tensorial.

As características mais importantes que devem ser observadas em um transdutor ultrassônico são: a Frequência e Impedância nominais, Sensibilidade, Nível de pressão de som, Largura de banda e a Diretividade ou ângulo de irradiação. A frequência nominal é frequência de ressonância do sensor. A magnitude da impedância obtida na frequência nominal é a definida como impedância nominal.

Sensibilidade é a tensão gerada pelo sensor, posicionado a uma dada distância da fonte sonora, por unidade de pressão de som recebida, geralmente expressa em escala logarítmica, onde 1 V/Pa (Volt por Pascal) corresponde a 0 dB. Nível de pressão do som é a pressão sonora produzida no centro do feixe irradiado a uma dada distância do sensor, geralmente expresso em dB, em que 2×10^{-5} Pa corresponde a 0 dB. Largura de banda é a faixa de frequência em que há um decréscimo de -6 dB na sensibilidade ou no nível de pressão sonora. Ângulo de irradiação é a faixa angular na qual há decréscimo de -6 dB no nível de pressão sonora em frequência nominal (OLIVEIRA, 2005).

Um dispositivo ultrassônico pode usar um único elemento ultrassônico tanto para emissão quanto para recepção, permitindo a diminuição do tamanho do dispositivo, porém limitando seu alcance em curtas distâncias (aumentando a área de "pontos cegos") visto que precisa alternar entre emitir ou escutar a onda sonora. Essa zona cega é uma área inutilizável que se fecha na face do sensor. O sensor não pode receber com precisão o eco se o feixe completar um ciclo de detecção antes que o sensor complete sua transmissão. O dispositivo ultrassônico possui a seguinte estrutura:

Figura 4 - Estrutura do sensor ultrassônico



- Transmissor/receptor: O transmissor utiliza um transdutor ultrassônico para emitir um trem de pulsos de ondas sonoras e o receptor recebe os ecos dessas ondas quando elas são refletidas por um objeto.
- Comparador e circuito detector: Quando o sensor recebe o eco refletido, o comparador calcula a distância do objeto, comparando o tempo decorrido entre a emissão do pulso até a recepção do eco.
- Saída: A saída do sensor possui uma interface elétrica, que permite enviar informações sobre seu estado para outros dispositivos (CAMARGO, 2013).

2.3 Transformada Wavelet

A transformada Wavelet (TW) é adequada para sinal estacionário e não estacionário, possui alta resolução de tempo e alta resolução de frequência. Além disso, a resolução de frequência de tempo e frequência muda. Essa transformada possui aplicações como mapeamento do tráfego, remoção de ruído, compressão de dados e reconhecimento de padrões. A equação matemática que descreve a transformada Wavelet é:

$$W(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} y(t) a^{-\frac{1}{2}} T\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (3)$$

em que: a um escalar, b é o parâmetro de translação e $y(t)$ o sinal original.

Um sinal quando analisado pela transformada Wavelet informa dados no domínio do tempo como no domínio da frequência, assim, é uma ferramenta que possibilita saber o início e fim de um determinado acontecimento (DAUBECHIES, 1990).

A transformada Wavelet contínua, doravante chamada CWT, é uma transformada integral linear que pode ser utilizada na exploração de características de sinais não estacionários para extrair informações de variações em certas bandas de frequências e/ou detectar estruturas locais presentes. A transformada Wavelet contínua é apresentada por (DAUBECHIES, 1992):

$$W_{W,x}(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) T_{a,b}(t) dt \quad (4)$$

Em que $T_{a,b}(t)$ são as Wavelets bases geradas por dilatação e translação a partir da Wavelet base também chamada de Wavelet Mãe (*Wavelet Mother*) $T(t)$,

$$T_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} T\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (5)$$

em que: a o parâmetro de escala (contração/dilatação) e b é o parâmetro de deslocamento. O valor $1/\sqrt{a}$ é o fator de normalização em termos de energia, em termos de amplitude o fator normalizado é $1/a$.

Segundo (CHUI, 1992 e SHENG, 1996) a Wavelet $W_{W,x}(a, b)$ gerada à partir da mesma função Wavelets-mãe $T(t)$ com escala a e localização b são diferentes, mas todas possuem a mesma forma. Os fatores de escala sempre são $a > 0$ e permite comprimir ou expandir a função Wavelet e indica o grau de resolução utilizado para analisar o sinal. Caso o fator seja $a > 1$ corresponde a uma visão global do sinal (expansão das ondas) enquanto que se o fator for $a < 1$ corresponde a ver detalhes do sinal (comprimido). O fator b permite o deslocamento da função wavelet no eixo temporal através do período de tempo que a função é definida $x(t)$. O resultado obtido ao aplicar a transformação Wavelet são os coeficientes $W_{W,x}(a, b)$, que são a função de escala e translação.

De maneira similar a Transformada de Fourier (FT) que decompõe um sinal em somas de exponenciais complexas, a CWT decompõe o sinal em soma de escalonadas e deslocadas versões de uma *Wavelet Mother* o que resulta em muitos coeficientes Wavelets que são função da escala e da posição. O escalamento consiste em esticar ou comprimir a Wavelet e a translação consistem em atrasar ou adiantar a Wavelet.

Na maioria dos sinais, os componentes de baixa frequência fazem correspondência à parte mais importante do sinal, ou seja, uma aproximação, e os componentes de alta frequência fazem correspondência às características detalhadas do sinal. Por esta razão é que na análise Wavelet utiliza-se as denominações de aproximação e detalhe. As aproximações são de alta escala, baixa frequência e os detalhes são de baixa escala, altas frequências. A cada nível j de decomposição é construída uma aproximação

A_j e um detalhe D_j , sendo o sinal original considerado como decomposição ao nível zero. O fator de escalamento a está relacionado com os níveis de decomposição por 2^j . Definindo a resolução como a^{-1} , pode-se afirmar que a resolução é inversamente proporcional a escala (OLIVEIRA, 2005).

Considerando os limites computacionais, os valores de escala e translação são usados de forma discreta, sendo assim:

$$a = 2^j, \quad b = k2^j, \quad (j, k) \in \mathbb{Z}^2 \quad (6)$$

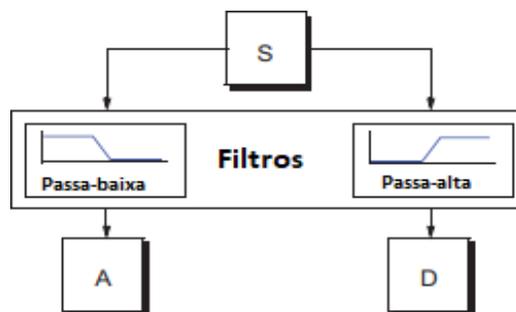
A Transformada Wavelet Discreta (Discret Wavelet Transform – DWT) difere da WT no que diz respeito aos fatores de escalamento e deslocamento os quais são contínuos na WT e em potência de 2 na DWT, assim tanto WT quanto a DWT podem operar em sinais contínuos, sendo que no caso da DWT os coeficientes são espaçados por um período de amostragem Δ . A DWT de um sinal contínuo e de um sinal discreto é dada em:

$$W_{W,x}(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(n) \frac{1}{\sqrt{a}} T\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \quad a = \Delta 2^j, \quad b = \Delta k 2^j, \quad (j, k) \in \mathbb{Z} \quad (7)$$

$$W_{W,x}(j, k) = \sum_{n=0}^{N-1} s[n] g_{j,k}(n), \quad a = 2^j, \quad b = k2^j, \quad (j, k) \in \mathbb{Z} \quad (8)$$

A aplicação da DWT em um sinal é a decomposição deste sinal utilizando dois filtros: um passa-baixa e outro passa-alta. Assim, a DWT baseia-se na decomposição do sinal em aproximações (filtro passa-baixa – FPB) e detalhes (filtro passa-alta – FPA) (COSTA, 2015). Essa decomposição por filtragem em altas e baixas frequências em conjunto com um processo chamado de *downsampling*, o qual consiste em simplesmente abandonar todos os pontos múltiplos de dois do sinal amostrado, gera os coeficientes da análise Wavelet (Oliveira, 2009). Esse processo é ilustrado na Figura 5.

Figura 5 – Banco de filtros simples, S é o sinal original, D detalhe e A aproximação

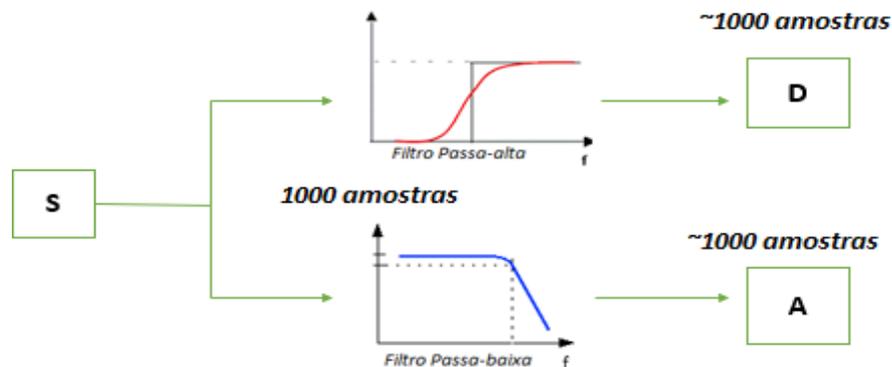


O processo de decomposição pode ser realizado várias vezes iterativamente dividindo o sinal em vários componentes de baixa frequência, o qual é chamado de árvore

de decomposição Wavelet. Teoricamente o processo pode continuar até o infinito, entretanto na prática o limite vai até a resolução de uma amostra por detalhe. Na realidade, a composição só pode prosseguir até os detalhes individuais consistirem numa única amostra ou pixel. Na prática, se seleciona um número adequado de níveis com base na natureza do sinal.

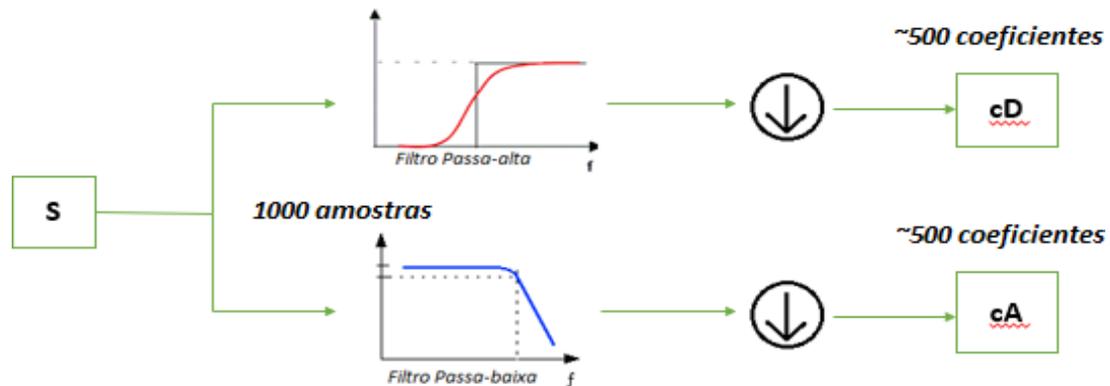
A decomposição por filtragem em altas e baixas frequências em conjunto com um processo chamado de *downsampling*, o qual consiste em simplesmente em abandonar todos os pontos múltiplos de dois do sinal amostrado, gera os coeficientes da análise Wavelet. O sinal original S , passa por dois filtros complementares e surge com dois sinais. Infelizmente, se realmente realizarmos esta operação com um sinal digital real, acabamos com o dobro dos dados com que se começa. Suponha, por exemplo, que o sinal S original consiste em 1000 amostras de dados. Então os sinais resultantes terão cada um 1000 amostras, para um total de 2000 (Figura 6).

Figura 6 – Exemplo do sinal passando por dois filtros



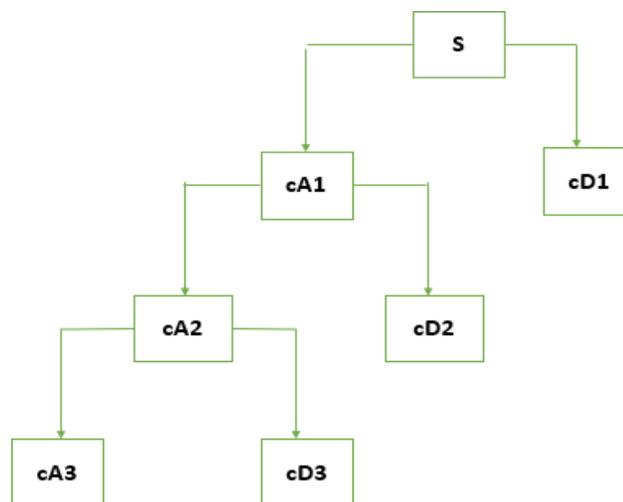
Esses sinais A e D são interessantes, mas se obtêm 2000 valores, em vez dos 1000 que havia. Existe uma forma mais sutil de realizar a decomposição utilizando Wavelets. Olhando cuidadosamente para o cálculo, podemos manter apenas um ponto de dois em cada uma das 2000 amostras de comprimento para obter a informação completa. Esta é a noção de *downsampling*. Produz duas sequências chamadas cA e cD (Figura 7), onde são coeficientes da DWT.

Figura 7 – Filtragem no nível mais simples, S é o sinal original, cD é o coeficiente de detalhe e cA é o coeficiente de aproximação



O processo de decomposição pode ser iterado, com aproximações sucessivas ser decomposto por sua vez, de modo a que um sinal seja decomposto em muitos mais baixos componentes de resolução. A isto chama-se a árvore de decomposição Wavelet que é ilustrado na Figura 8.

Figura 8 – Árvore de decomposição Wavelet

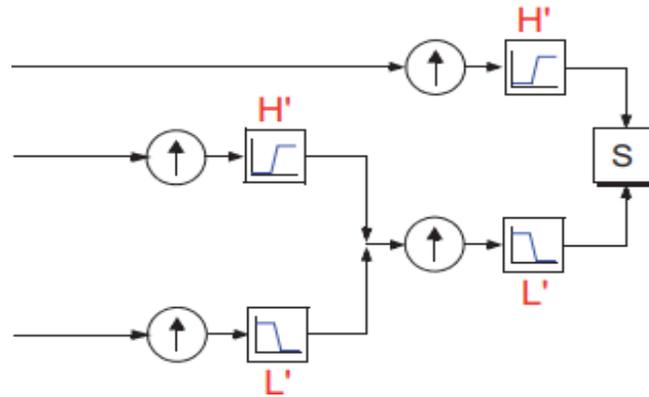


Uma vez que o processo de análise é iterativo, em teoria pode ser continuado indefinidamente. Na realidade, a decomposição só pode prosseguir até os detalhes individuais consistirem numa única amostra ou pixel. Na prática, selecionará um número de níveis com base na natureza do sinal, ou num critério adequado como a entropia.

A transformada Wavelet discreta pode ser usada para analisar ou decompor sinais e imagens. Este processo é chamado decomposição ou análise. A outra metade da história é como esses componentes podem ser montados de volta ao sinal original sem perda de

informação. Este processo é chamado reconstrução ou síntese. A manipulação matemática que afeta a síntese é chamada a transformada wavelet discreta inversa (IDWT), essa análise é ilustrada na Figura 9.

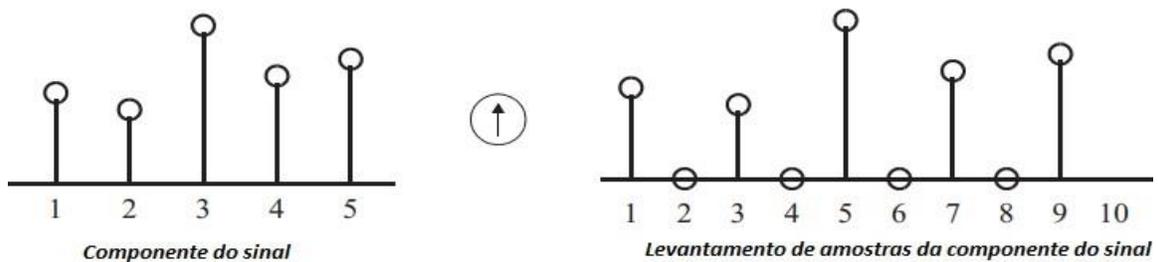
Figura 9 – Reconstrução dos coeficientes do sinal



Fonte: Adaptado de Wavelet Toolbox – Matlab

Quando a análise de wavelet envolve filtragem e downsampling, o processo de reconstrução wavelet consiste em levantamento de amostras e filtragem. O levantamento de amostras é o processo de alongamento de um componente de sinal através da inserção de zeros entre amostras, um exemplo é mostrado na Figura 10.

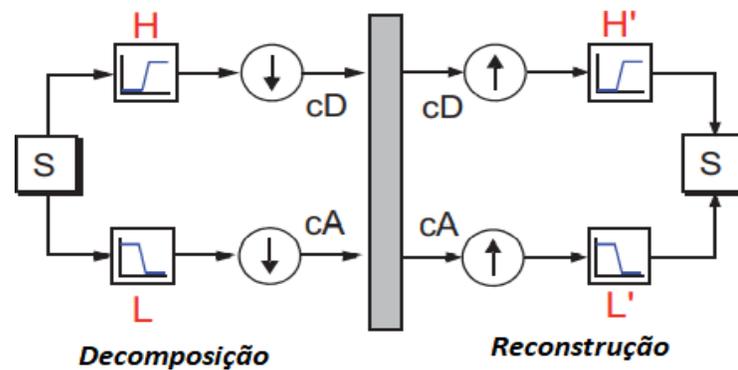
Figura 10 – Processo de alongamento através da inserção de zeros entre amostras



Fonte: Adaptado de Wavelet Toolbox – Matlab

A parte filtrante do processo de reconstrução também é objeto de alguma discussão, porque é a escolha dos filtros que é crucial para alcançar a perfeição reconstrução do sinal original. A amostragem dos componentes do sinal realizada durante a fase de decomposição introduz uma distorção chamada *aliasing*.

Figura 11 – Fases de decomposição e reconstrução do sinal

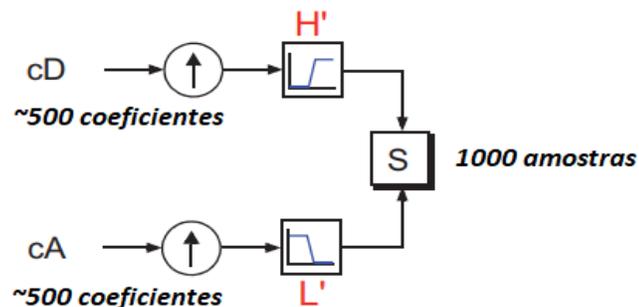


Fonte: Adaptado de Wavelet Toolbox – Matlab

Acontece que escolhendo cuidadosamente os filtros para as fases de decomposição e reconstrução estreitamente relacionados (mas não idênticos), podemos “cancelar” os efeitos de aliasing. Os filtros passa baixa e passa alta de decomposição de alta passagem (L e H), formam um sistema que se chama quadratura filtros-espelho, ilustrado na Figura 11.

É possível reconstruir o nosso sinal original a partir dos coeficientes das aproximações e detalhes, pode-se dar um exemplo como o da Figura 12.

Figura 12 – Reconstrução dos coeficientes de detalhe e de aproximação

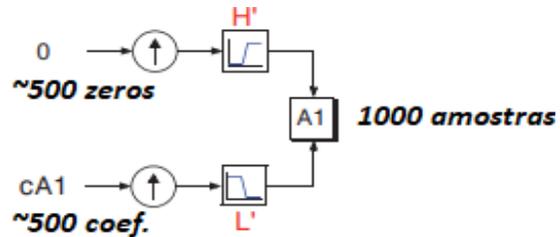


Fonte: Adaptado de Wavelet Toolbox – Matlab

Sendo também possível reconstruir as próprias aproximações e detalhes através dos seus vetores de coeficiente. Considerando como reconstruir a aproximação de primeiro nível A1 a partir do vetor de coeficiente $cA1$. Passando o vetor de coeficiente $cA1$ através do mesmo processo a que se costuma reconstruir o sinal original. No entanto,

em vez de o combinar com o nível-um de detalhe cD1, alimenta-se num vetor de zeros em vez dos coeficientes de detalhe vetor, ilustrado na Figura 13:

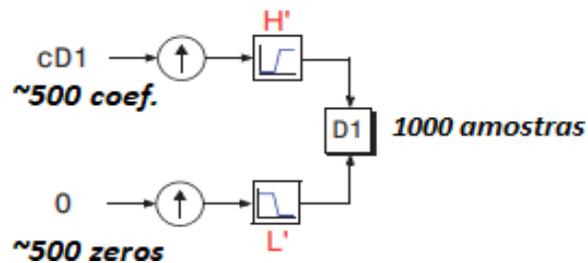
Figura 13 – Reconstrução de aproximação do primeiro nível



Fonte: Adaptado de Wavelet Toolbox – Matlab

O processo produz uma aproximação reconstituída A1, que tem o mesmo comprimento como o sinal S original e que é uma verdadeira aproximação do mesmo. Da mesma forma, pode-se reconstruir o detalhe de primeiro nível D1, utilizando o mesmo processo:

Figura 14 – Processo de reconstrução do coeficiente de detalhe



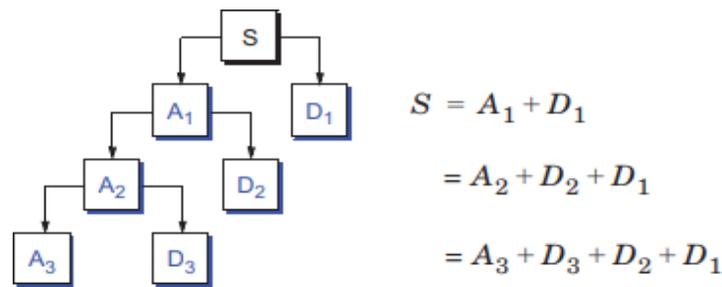
Fonte: Adaptado de Wavelet Toolbox – Matlab

As reconstruções de detalhes e de aproximações são verdadeiros constituintes do sinal original. De fato, quando os combinamos, temos o seguinte:

$$S = A_1 + D_1 \quad (9)$$

Se nota que os vetores de coeficiente cA1 e cD1 – foram produzidos por *downsampling* e são apenas metade do comprimento do sinal original – não podem ser combinados diretamente para reproduzir o sinal. É necessário reconstruir as aproximações e detalhes antes de os combinar. Fazendo o mesmo procedimento para todos os multiníveis, se encontra as relações semelhantes de todos os componentes do sinal reconstruído (Figura 15).

Figura 15 – Componentes de sinal reconstruídos



Fonte: Adaptado de Wavelet Toolbox – Matlab

O processo de filtragem no processo de reconstrução resulta em várias discussões, porque a escolha dos filtros é crucial para alcançar a perfeita síntese do sinal original. No processo de *downsampling* dos componentes realizado durante a decomposição introduz o efeito de *aliasing* e, portanto, a escolha cautelosa de filtros parecidos mais não idênticos no processo de decomposição e de síntese leva ao cancelamento desse efeito (OLIVEIRA, 2009).

Uma das limitações da transformada de Fourier se encontra no fato de que ela não permite analisar em separado diferentes trechos do sinal. Assim, caso um trecho seja extremamente ruidoso ou contenha pontos anômalos, o processamento de todo o sinal é comprometido. Desse modo pode-se dizer que a TW é uma ferramenta matemática capaz de concentrar em transitórios e de alta frequência melhor do que a Transformada de Fourier de tempo curto (STFT – *Short Time Fourier Transform*). Para a STFT o tamanho da janela da frequência é selecionado, todas as frequências são analisadas com resoluções de mesmo tempo e frequência, diferentes no que acontece na TW, que tem um tamanho de janela adaptativo as frequências.

- Tamanho da janela:
 - Invariante
- Janela pequena:
 - Pouca informação do sinal (Princípio da incerteza);
 - Muito processamento;
- Janela grande:
 - Aumenta o erro ao considerar o sinal ser estacionário (Princípio da incerteza);
- Transformada janelada:

- Janelas de tamanho variável

- Intervalos maiores → maior precisão sobre baixas frequências
- Intervalos menores → maior precisão sobre altas frequências

A transformada de Fourier decompõe o sinal em funções senoidais de diferentes frequências. Da mesma forma, a transformada Wavelet transforma uma função em um conjunto de funções.

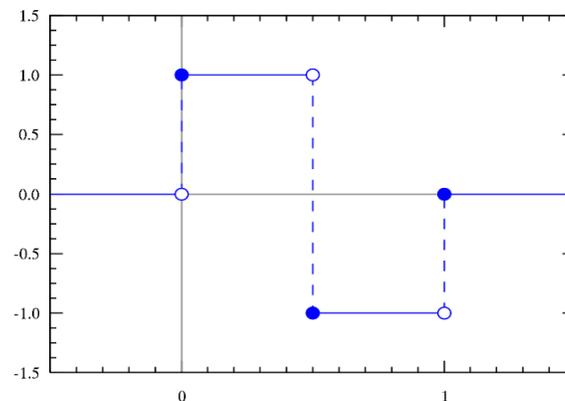
2.4 Famílias da Transformada Wavelet

2.4.1 Wavelet Haar

É uma transformada discreta usada no processamento e análise de sinais. A Wavelet de Haar é um caso particular das Wavelets de Daubechies, conhecida como Daubechies db1, onde o Wavelet é um pulso quadrado definido por:

$$\Psi(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t < 0.5 \\ -1, & 0.5 \leq t < 1 \\ 0, & \text{para outros valores de } t \end{cases}$$

Figura 16 – Ilustração da Wavetet de Haar



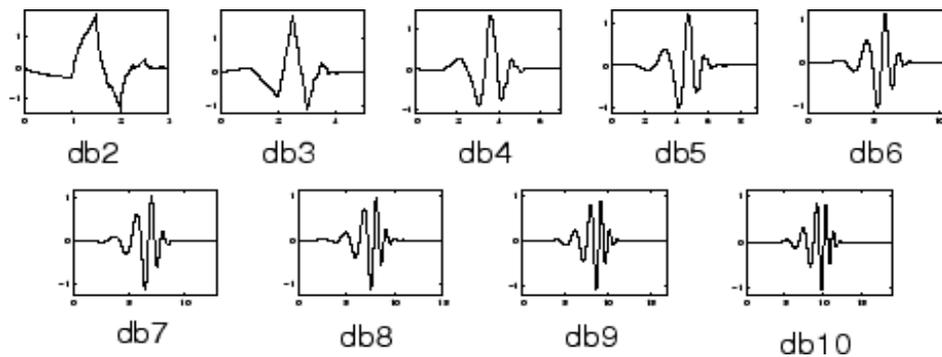
Fonte: https://www.wikiwand.com/pt/Transformada_de_Haar

2.4.2 Wavelet Daubechies

Em 1990, Ingrid Daubechies usou os trabalhos de Mallat, para construir um conjunto de bases ortonormais de wavelets suaves, com suportes compactos. Os trabalhos de Daubechies são os alicerces das aplicações atuais das Wavelets.

As wavelets ortogonais de Daubechies, “dbN”, são perfeitamente compactas no tempo, mas no domínio da frequência, tem um alto grau de superposição espectral entre as escalas. Sua maior vantagem é serem ortogonais, o que significa que um erro no sinal de entrada não cresce com a transformação e a estabilidade numérica computacional é assegurada. Por outro lado, não possuem fase linear.

Figura 17 – Wavelet Ψ do tipo Daubechies

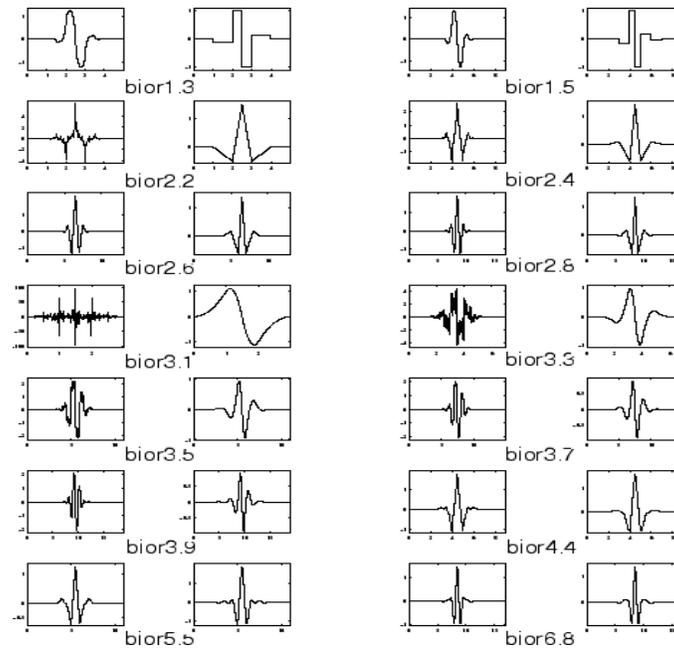


Fonte: Delfino C.

2.4.3 Wavelet Biortogonais

A família de Wavelets biortogonais exhibe a propriedade de fase linear, a qual é necessária para a reconstrução do sinal. Usa duas Wavelets, uma para a decomposição e outra para a reconstrução, em lugar de uma só. Esta Wavelet tem suporte compacto e é simétrica. As wavelets biortogonais são definidas como pares de bases mutuamente ortogonais, mais nenhum desses pares é ortogonal (DELFINO, 2020).

Figura 18 – Wavelet Ψ do tipo Biortogonais

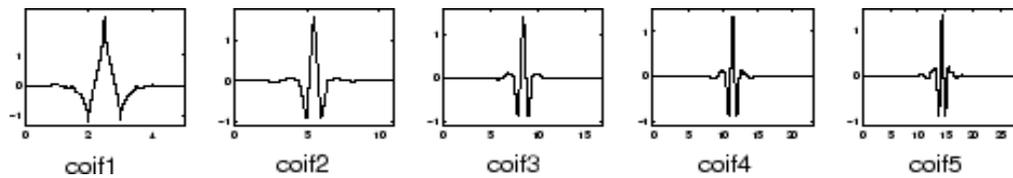


Fonte: Delfino C.

2.4.4 Wavelet Coiflets

Construído por I. Daubechies a pedido de R. Coifman. A função Wavelet tem $2N$ momentos iguais a 0 e a função de escala tem $2N-1$ momentos iguais a 0. As duas funções têm um suporte de comprimento $6N-1$.

Figura 19 – Wavelet Ψ do tipo Coiflet

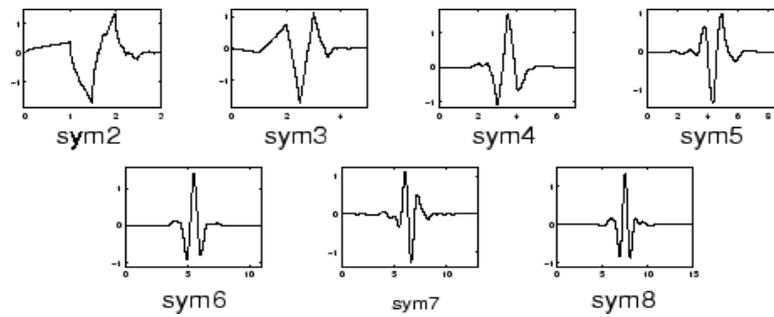


Fonte: Delfino C.

2.4.5 Wavelet Symlets

Este tipo de Wavelet foi proposto por Daubechies como uma modificação à família “dbN”, com possuem propriedades similares, e tendem a ser simétricas.

Figura 20 – Wavelet Ψ do tipo Symlet

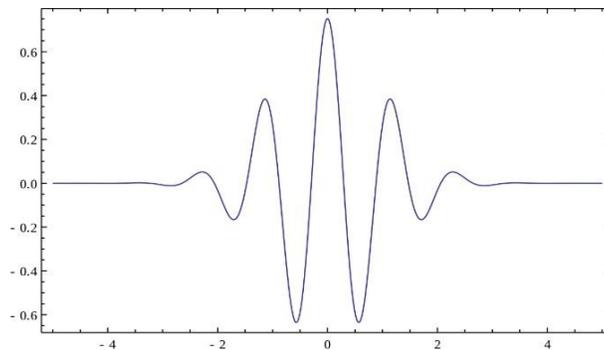


Fonte: Delfino C.

2.4.6 Wavelet de Morlet

A Wavelet de Morlet (ou Wavelet de Gabor) é uma wavelet composta de um exponencial complexo (portador) multiplicado por uma janela gaussiana (envelope).

Figura 21 – Wavelet de Morlet com valor real



Fonte: https://www.wikiwand.com/em/Morlet_wavelet

Figura 22 – Wavelet de Morlet de valor complexo



Fonte: https://www.wikiwand.com/em/Morlet_wavelet

2.4.7 Wavelet de Meyer

A wavelet de Meyer é uma wavelet ortogonal proposta por Yves Meyer como um tipo de um wavelet contínua que foi aplicado numa série de casos, tais como em filtros adaptativos, fractal campos aleatórios, e a classificação de múltiplas falhas.

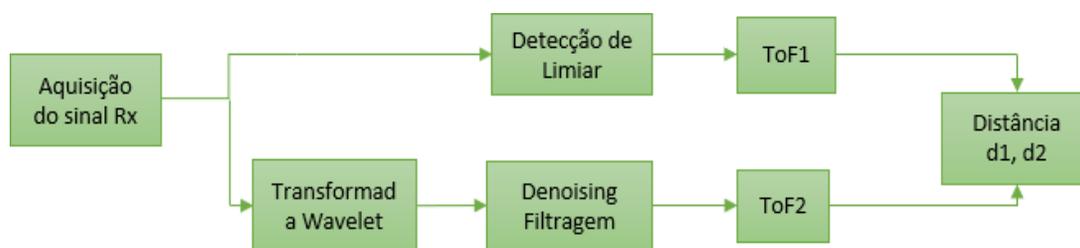
2.4.8 Escolhendo a Família Wavelet

De acordo com o artigo publicado (GRIMALDI, 2006) diz quê uma família de Wavelets pode ser construído a partir de uma função, chamada “wavelet mãe” ou “base”. Devemos optar pela família que mais se assemelha ao sinal que projetamos, para isso foi realizada uma simulação utilizando o aplicativo *Analyzer Wavelet* presente no software Matlab, onde foi escolhida a família Daubechies de ordem 6 ficando assim db6 com 3 níveis.

3. Metodologia

Os transdutores ultrassônicos são amplamente empregados em vários ramos da pesquisa científica, de forma particular, na instrumentação de equipamentos de medição de distância e de velocidade de vento. Adota-se que o princípio de funcionamento dos transdutores de ultrassom é baseado na medição do Tempo de Trânsito (ToF), este pode ser estimado utilizando o método da Diferença de Tempo, que neste trabalho serão implementados utilizando as técnicas de detecção de limiar (TH-Threshold) e a Transformada Wavelet em conjunto com a detecção de limiar. Assim este capítulo tem como base a identificação dos métodos utilizados para calcular a distância, na Figura 23 é apresentado o fluxograma proposto.

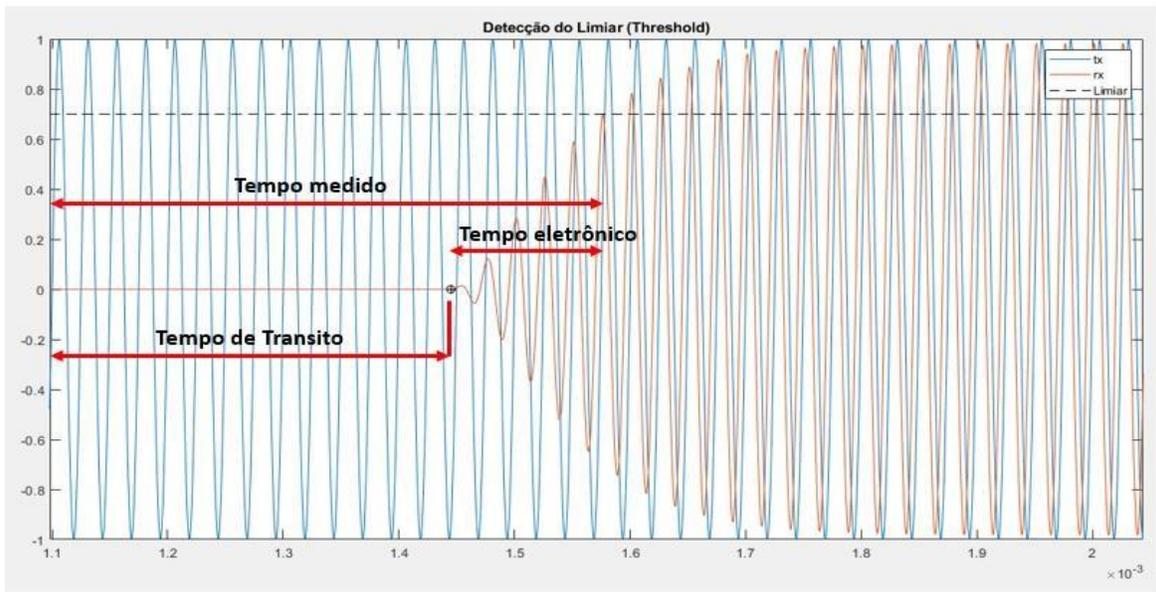
Figura 23 – Fluxograma dos métodos para a estimação da distância



3.1 Estimação do ToF usando a Detecção de Limiar

O pressuposto do *ToF* pela técnica de Detecção do Limiar consiste em transmitir um determinado número de períodos de ondas senoidais a partir do transdutor transmissor (*Tx*) e medir o tempo necessário para sua detecção (*ToF*) no transdutor receptor (*Rx*), por meio da detecção de um nível de referência ou limiar (*TH – Threshold Level*) como ilustrado na Figura 24, que é ilustrada pela amplitude em relação ao tempo.

Figura 24 – Medição do ToF utilizando a técnica de Detecção de Limiar



Devido aos atrasos impostos pelos transdutores, que inclui o tempo de emissão e a resposta transitória do transdutor receptor no tempo, o do tempo de propagação do sinal no meio (t_{ToF}) pode ser calculado através da subtração entre o valor medido do ToF (t_M) com o tempo de detecção (t_E), que é o intervalo de tempo decorrido entre a recepção do sinal e sua detecção. Assim:

$$t_{ToF} = t_M - t_E \quad (10)$$

Como visto no capítulo 2, a medição da distância em metros pela técnica de Detecção de Limiar (TH) é dada por:

$$L = \frac{1}{2} \cdot t_{ToF} (20.074 \cdot \sqrt{273.15 + T_{°C}}) \quad (11)$$

em que L é a distância entre os transdutores, T_K é a temperatura (em Celsius) e t_{ToF} é o tempo de propagação do sinal no meio.

Substituindo a equação 10 na equação 1, temos que:

$$L = (t_M - t_E) \cdot C/2 \quad (12)$$

Técnicas tradicionais como Detecção de Limiar (TH) e Diferença de Fase (PD) são utilizadas para estimação de ToF , mas tais técnicas são sensíveis ao ruído. Outras técnicas de processamento digital de sinais também já foram implementadas tais como a transformada Wavelet e o filtro de Kalman, porém estas técnicas possuem um alto custo computacional e complexidade de implementação em um sistema embarcado para medição.

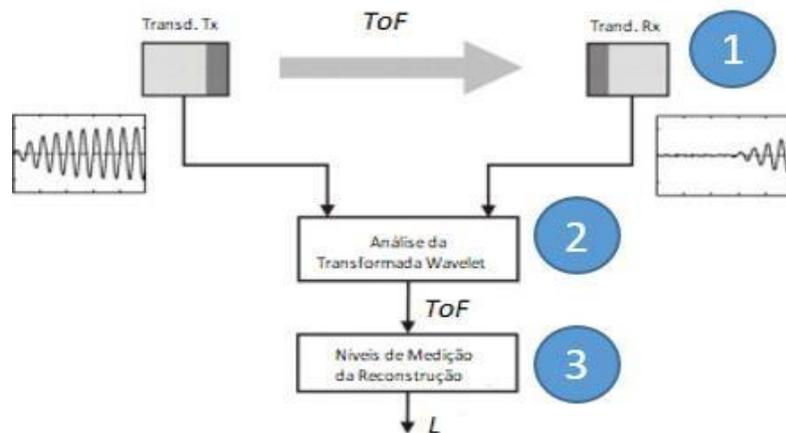
A Detecção do Limiar é uma técnica de baixo custo e de fácil implementação, porém deve ser utilizada quando não se exige elevada exatidão, devido principalmente à baixa relação sinal-ruído (COSTA, 2015).

3.2 Estimação do ToF usando a Transformada Wavelet

As transformadas são funções matemáticas utilizadas para mapear sinais de um domínio para outro. Particularmente importantes no processamento e análise de sinais, pois no domínio transformado, algumas propriedades do sinal ficam evidentes (COSTA, 2015), o modelo de medição é o apresentado na Figura 1. A análise Wavelets é capaz de revelar aspectos dos dados que outras análises de sinal falham, tais como tendências, pontos de desarranjo, descontinuidades em derivadas de ordem superior, e semelhança, além de reduzir ruído de um sinal sem muita degradação do mesmo.

Na Figura 25, o modelo de medição é ilustrado, para que o sinal ultrassônico recebido é considerado como afetados por uma incerteza aditiva (ruído). O simulador desenvolvido é composto por um transmissor e um receptor ultrassônico, modelado no Matlab Simulink.

Figura 25 – Modelo de medição ToF usando a Transformada Wavelet



Fonte: Igaroca, N. S. C.; Villanueva, J. M. M.; Catunda, S. Y. C.; Santiago, J. L. G.; Vargas, C. E. T.

Etapa 1:

O transmissor e receptor é adaptado para que a propagação da onda ultrassônica viaje através de um ambiente afetado pela velocidade do vento e ruído. Nessa etapa mostra um sinal oscilatório transmitido a 40 KHz, com uma largura de banda de 6 KHz e o sinal recebido é afetado por ruído com uma potência do sinal entre 0.0005 a 0.1.

Etapa 2:

Com o sinal recebido no transdutor receptor foi realizado o uso do aplicativo de Analyzer Wavelet com a finalidade de decompor o sinal em seus coeficientes de aproximação e detalhe, onde primeiramente se definiu a família Daubechies que é escrita dbN onde N é a ordem e db corresponde ao nome da Wavelet e, também, colocando seu devido nível de decomposição e a partir do coeficiente cA3 que é o sinal filtrado se aplicava o limiar para encontrar o ToF.

Etapa 3:

A partir do resultado do ToF obtido na etapa 2 e usando as equações (1) e (2) é estimada a distância. E que por fim se calculava o desvio padrão da distância e do ToF.

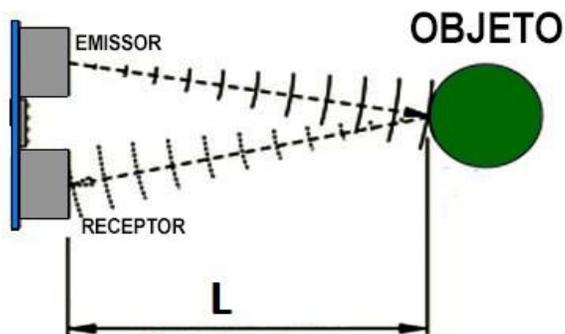
3.3 Estimação indireta da distância usando o ToF

O método de pulso eco é baseado na estimação da diferença de tempo entre o eco do pulso de ultrassom transmitido até a detecção do pulso eco no transdutor receptor (NEVES, 2018). Esse método de medição, utilizando transdutores ultrassônicos, é chamado de *Time-of-Flight* (ToF), para o qual um ultrassom é emitido e o tempo decorrido entre a transmissão e a recepção é medida.

Este tempo de propagação ultrassônico é definido como o Tempo de Trânsito (ToF – Time-of-Flight) e é utilizado para a determinação da distância, mediante as expressões que relacionam os tempos de propagação dos sinais ultrassônicos com as velocidades de propagação (PÀLLAS-ARENY, 2001).

Uma configuração habitual para medir a distância usando transdutores ultrassônicos é para alinhar o transdutor transmissor e o transdutor receptor, como mostra a Figura 26.

Figura 26 - Medição da distância em relação ao ToF



Fonte: Adaptado de Barbosa E. N. F.; Reis H. C.

Sendo assim, a distância pode ser determinada por:

$$2L = C \times t_{ToF} \quad (13)$$

Onde t_{ToF} é o Time-of-Flight ultrassônico que é o tempo necessário para que a onda ultrassônica viaje de um transdutor para o outro e C é a velocidade do som.

Na equação 13 observa-se que a estimação da distância depende da velocidade do som e da estimação do ToF. Sendo que a estimação da velocidade do som pode ser determinada por meio da medição da temperatura, portanto, a grandeza de interesse vem a ser o ToF.

3.4 Comparação dos Métodos de ToF

Com a finalidade de realizar a comparação dos métodos do Tempo de Trânsito apresentados anteriormente, apresenta-se uma descrição resumida entre eles na Tabela 1. A partir destas comparações, pode-se justificar o uso das técnicas da Detecção de Limiar e da transformada Wavelet no projeto de um sistema de instrumentação para medição da distância.

Tabela 1 - Comparação entre as técnicas baseadas no método de Tempo de Trânsito

Método	Processamento	Vantagens	Desvantagens
--------	---------------	-----------	--------------

<p>Detecção de Limiar</p>	<p>Detecção do sinal a partir de um nível de limiar predefinido.</p>	<p>Simple implementação; Baixo consumo de energia; Baixo custo.</p>	<p>Influências na medição da temperatura e na detecção do limiar. Apresenta maior incerteza na medição do ToF, que as outras técnicas.</p>
<p>Transformada Wavelet</p>	<p>Processamento de sinais, informa dados no domínio do tempo como no domínio da frequência. Decomposição por filtragem em altas e baixas frequências (<i>downsampling</i>). Reconstrução do sinal a partir do processo de decomposição (<i>upsampling</i>).</p>	<p>Quando de posse do fator de escala fixo, apresenta um desempenho melhor do que quando se utiliza a correlação cruzada clássica.</p>	<p>Elevado custo computacional, que se agrava na medida em que não se tem conhecimento da quantidade de escalonamento que deve ser realizado, aumentando assim a complexidade computacional do sistema; A escolha da Wavelet-mãe, por meio do qual o sinal é escalonado, determinará a qualidade dos resultados nos casos de decomposição e reconstrução. Complexidade para aplicações embarcadas em hardware de baixo custo.</p>

4. Resultados

Nesta seção serão apresentados os resultados de simulação para medição de distância utilizando transdutores ultrassônicos. Serão abordadas duas técnicas de estimação do ToF, tais como: a) Detecção de Limiar; e b) Transformada Wavelet. Entre os objetivos desta seção, está em verificar que as técnicas da estimação do ToF pela Transformada Wavelet permitem realizar a filtragem do sinal em presença de ruído e é possível obter estimações com maior exatidão quando comparado com as técnicas tradicionais. Para este estudo, o modelo é baseado em uma formulação matemática e a simulação é realizada utilizando-se do software *Simulink (Matlab©)*, para verificar a consistência das análises realizadas. Assim, utilizam-se técnicas de simulação para imitar o comportamento físico real.

4.1 Cenário de Simulação

Atualmente, os transdutores ultrassônicos são considerados uma importante ferramenta para aplicações industriais e científicas. Muitos exemplos podem ser encontrados em diferentes áreas, tais como: análise química, tratamento de águas residuárias, imagens médicas, navegação de robôs, medição de nível, e velocidade de fluidos, etc.

Um problema típico com a estimação do ToF refere-se ao compromisso existente entre a resolução do relógio do sistema e a relação sinal-ruído (SNR). A resolução finita do tempo do sistema introduz incertezas que podem ser reduzidas por meio de técnicas de interpolação, reduzindo-se assim o erro devido à resolução. Essa incerteza de medição é um parâmetro (que pode ser, por exemplo, o desvio padrão), associado ao resultado de medição, que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser razoavelmente atribuídos a grandeza submetida a medição.

A medição de distância através do sensor ultrassônico por tempo de trânsito está diretamente ligada à velocidade do som. Boa parte dos dispositivos comerciais adotam uma velocidade do som constante. Porém a velocidade do som varia com a temperatura e tal variação pode propagar erros de medição notáveis ao medir distância via tempo de trânsito.

Desta maneira, a distância medida com função da temperatura pode ser encontrada através da substituição da equação 2 na equação 11:

$$L = \frac{1}{2} \cdot (20.074 \sqrt{273.15 + T_{\text{°C}}}) \cdot t_{\text{ToF}} \quad (14)$$

em que: L é a distância, $T_{\text{°C}}$ é a temperatura em graus Celsius e t_{ToF} é o tempo de trânsito.

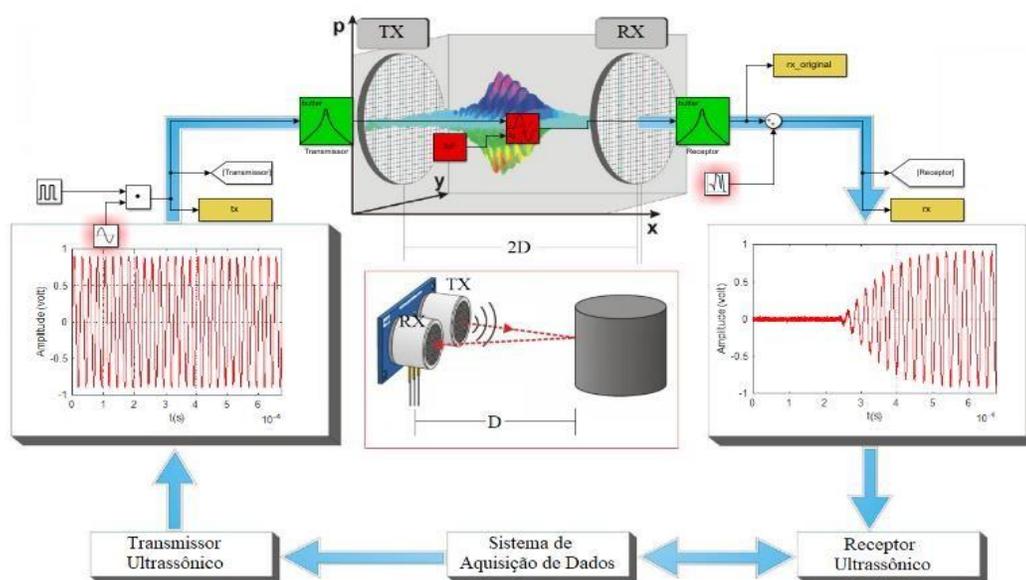
A medição do Tempo de Trânsito é realizada por meio das técnicas de Detecção de Limiar (TH) e da Transformada Wavelet (TW). O modelo do sistema de medição foi simulado no Simulink (Matlab©).

4.2 Modelagem de Simulação em Matlab/Simulink

O Simulink é um software utilizado para modelar, simular e analisar o comportamento do sistema dinâmico. Possui uma interface gráfica com o usuário de modo a possibilitar a construção de modelos utilizando-se diagramas de blocos que podem ser prontos ou ajustados de acordo com cada necessidade.

O sistema utilizado para realização das simulações é composto por dois transdutores ultrassônicos, um deles funcionando como transmissor (Transdutor 1, Tx) e o outro funcionando como receptor (Transdutor 2, Rx), com uma frequência central de 40 kHz e uma frequência de amostragem de 1200 KHz, o trabalho desenvolvido no Simulink é mostrado na Figura 27.

Figura 27 - Diagrama de blocos do sistema de medição baseado em ultrassom



O modelo é composto principalmente pelos seguintes blocos: transdutor transmissor/receptor, meio de transmissão e atraso. O modelo do transdutor são filtros passa-faixa centralizado em 40 KHz, com uma largura de banda de 6 KHz e uma frequência de amostragem de 1200 KHz. Os filtros foram do tipo butterworth, dado que na banda passante não introduzem deformação no sinal. Através desse modelo e pelo artigo (CARDOSO, 2019) foram realizadas o desenho das placas no Kicad (Anexo A).

A geração da onda senoidal é formada por meio de três blocos no software Simulink: um gerador de pulsos, um gerador de sinais senoidais e um bloco de multiplicação.

O bloco gerador de sinais senoidais é responsável por gerar a forma de onda senoidal de 40 KHz. O bloco gerador de pulsos é utilizado para gerar pulsos em intervalos de tempo regulares. O bloco que realiza a multiplicação realiza a multiplicação entre os dois sinais e em sua saída obtém-se uma quantidade determinada de ondas senoidais, que são enviadas ao transdutor de transmissão. Na Figura 28 é ilustrado o conjunto dos blocos mencionados, e na Figura 29 a forma de onda injetada no transdutor transmissor.

Figura 28 - Bloco responsável por gerar onda senoidal de 40 KHz

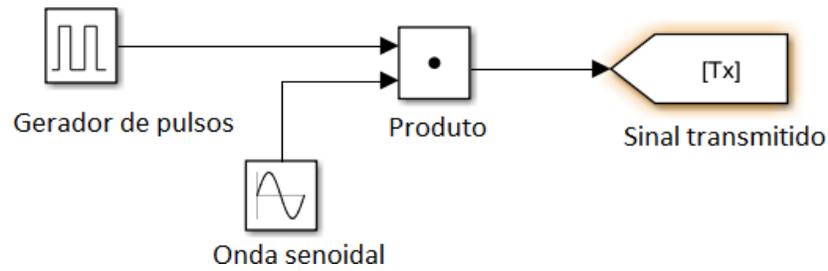
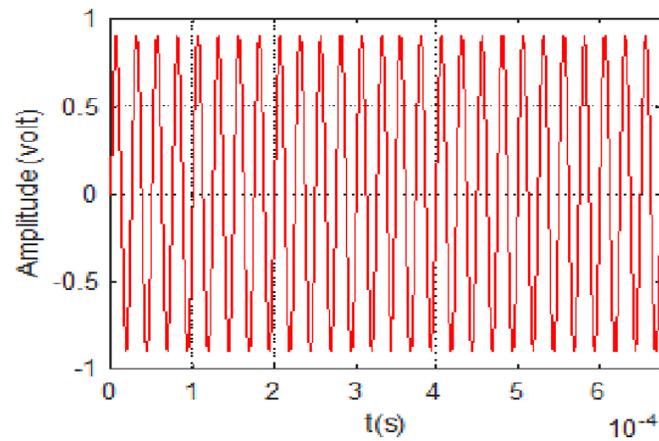
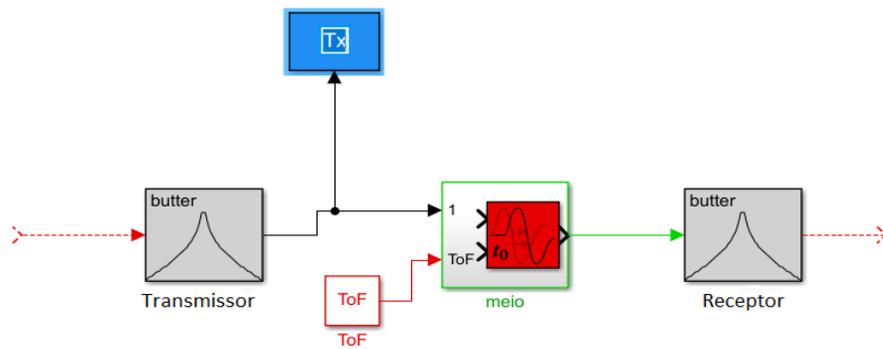


Figura 29 - Forma de onda senoidal de 40 KHz



O meio de transmissão do sinal 1 é representado pelo diagrama em blocos ilustrado na Figura 30. O meio de transmissão é composto por um bloco de atraso chamado de atraso de tempo que possui duas entradas, uma de dados que recebe as ondas senoidais do transmissor e a outra entrada de tempo de atraso, que é a entrada do ToF. A saída deste bloco é o sinal de entrada atrasado de ToF.

Figura 30 - Bloco responsável por gerar o atraso ToF



O sinal de conexão intermediária é somado ao ruído, onde esse ruído gera números aleatórios uniformemente distribuídos, com média zero e desvio padrão σ . A Figura 31 ilustra esse conjunto de blocos. A esse sinal de saída pode ser aplicada qualquer técnica como detecção de limiar, diferença de fase ou transformada Wavelet. A Figura 32 ilustra a forma de onda recebida no transdutor de recepção.

Figura 31 - Conjunto de blocos responsável pela recepção do sinal

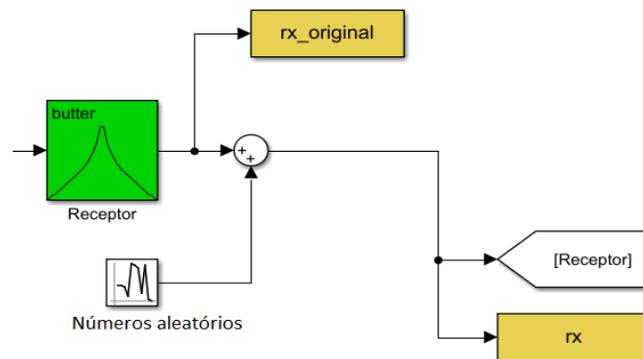
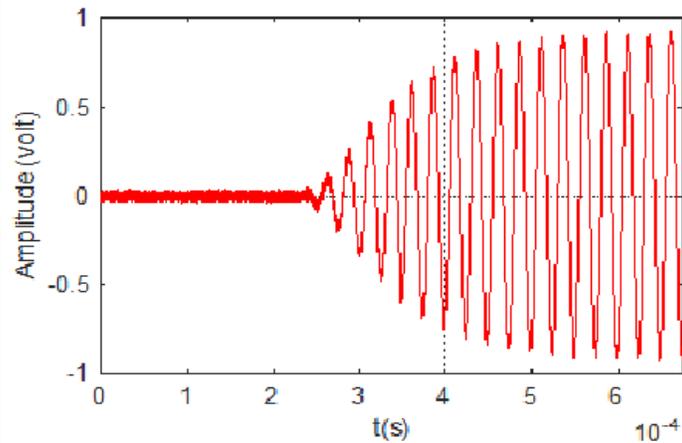


Figura 32 - Sinal recebido no transdutor receptor



4.3 Resultados de simulação usando o método da Detecção de Limiar

Utilizando da metodologia explicada na seção 3.1, sabemos que a detecção de limiar (*TH*) é uma técnica muito utilizada para estimação de ToF, mas é sensível ao ruído. Este método consiste em transmitir ondas senoidais a partir do transdutor transmissor e medir o tempo necessário para sua detecção (ToF) no transdutor receptor. Entretanto, devido a dinâmica dos transdutores existe um atraso e o valor medido do ToF não corresponde diretamente ao tempo de recepção. Com isso, o valor medido do tempo é expressada como a soma do tempo de transmissão com o tempo de detecção.

Para analisar o modelo para a medição da distância foi realizada uma simulação para determinar o tempo de atraso eletrônico devido às características dos transdutores ultrassônicos. O modelo foi implementado com as seguintes especificações:

- Frequência de operação dos transdutores: $f = 40 \text{ KHz}$;
- Frequência do relógio do sistema: $f_s = 1200 \text{ KHz}$ ($T_s = 8.333 \mu\text{s}$);
- Faixa de temperatura do meio: $T_c = 25 \text{ }^\circ\text{C}$;
- Dado inicial para a distância estimada: $d = (0.25, 0.5 \text{ e } 1)\text{m}$, com isso o tempo eletrônico é: $t^E = 131.66 \mu\text{s}$, $131.65 \mu\text{s}$ e $131.63 \mu\text{s}$, respectivamente.

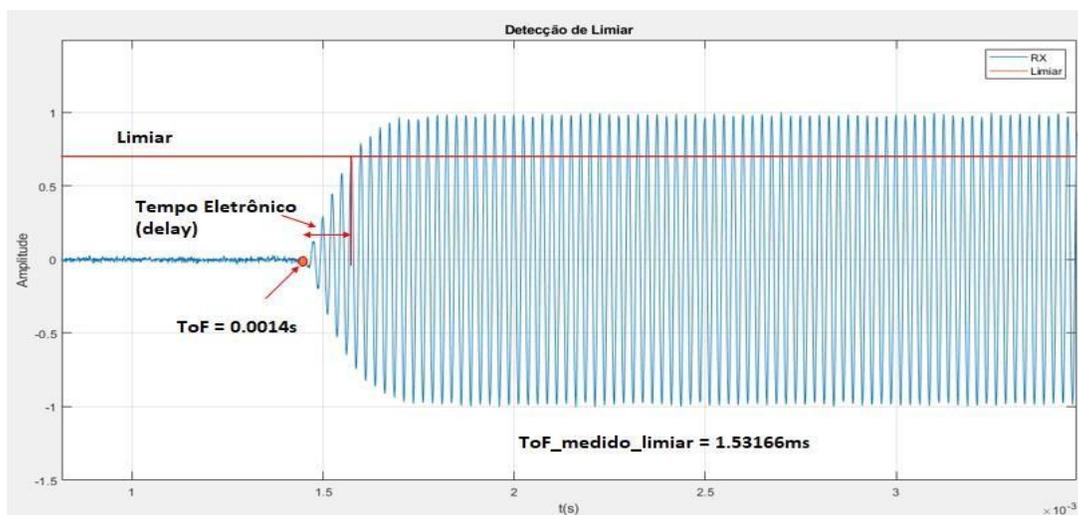
O tempo de atraso eletrônico surge devido ao retardo imposto pela dinâmica dos transdutores e deve ser determinado por meio de um processo de aferição para compensar seu efeito nos cálculos do tempo de trânsito pela técnica de Detecção de Limiar (*TH – Threshold Detection*). Esse delay foi obtido na simulação através da equação 10.

Na Tabela 2 mostra os resultados das simulações realizadas no Matlab que par determinado nível de ruído foram calculadas a média do ToF, a distância estimada e seus respectivos desvio padrão. Perceba que com o aumento do nível de ruído (potência do sinal), o resultado para a distância estimada se tem um erro de aproximadamente 20% do esperado, com isso podemos dizer que a detecção de limiar é válida apenas para baixos níveis de ruído e comprova sua sensibilidade. As Tabelas 3 e 4 são similares.

- Para uma distância de 0.25 m, o tempo eletrônico é calculado a seguir:

$$\text{Tempo delay} = \text{ToF}_{\text{medido}_{\text{limiar}}} - \text{ToF} = 131.66 \mu\text{s}$$

Figura 33 - Para um ruído = 0.0001



Os gráficos 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43 e 44 são os gráficos obtidos na simulação no Matlab para uma distância estimada de 0.25 m, 0.5 m e 1 m, onde cada um deles representa o sinal com um nível de ruído diferente. Foi posto na simulação um limiar de 0.7 e as equações (1) e (2) para o cálculo do ToF e da distância estimada. Na Figura 33, por exemplo, está ilustrada a reta do limiar e o sinal recebido, que quando o sinal toca no limiar se obtêm o tempo de atraso ou tempo eletrônico e o ToF é encontrado a partir da equação (1). Perceba na Figura 34 com o ruído de 0.04 que o ToF estimado é diferente do ToF esperado porque sua detecção na reta do limiar é efetuada antes do ToF esperado, o mesmo acontece nas Figuras 39 e 43. Todas as Figuras de resultados de simulações é referente a amplitude do sinal em relação ao tempo.

Figura 34 - Para um ruído = 0.04

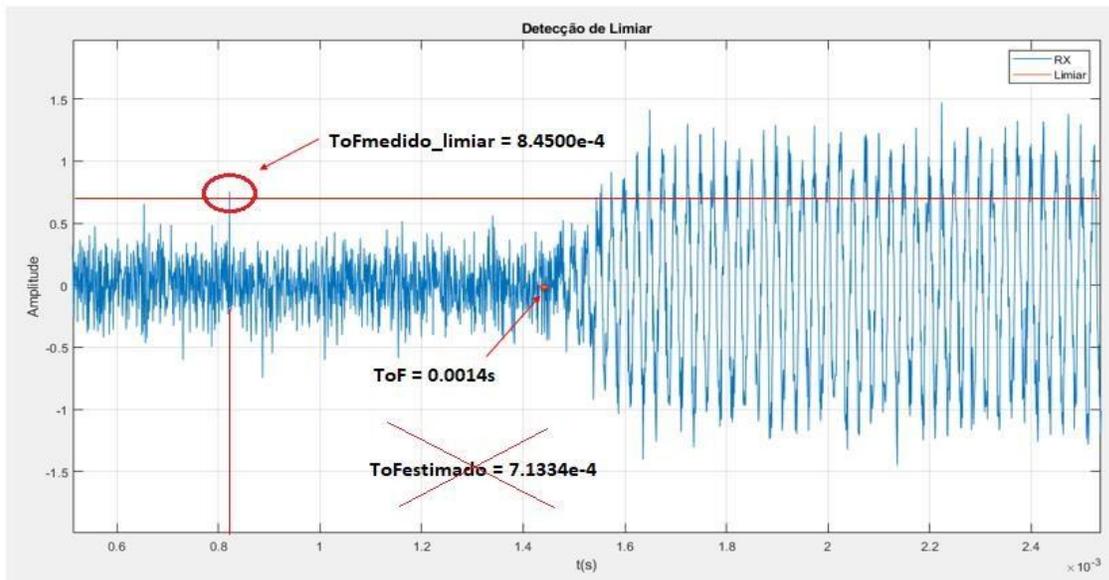


Figura 35 - Para um ruído = 0.005

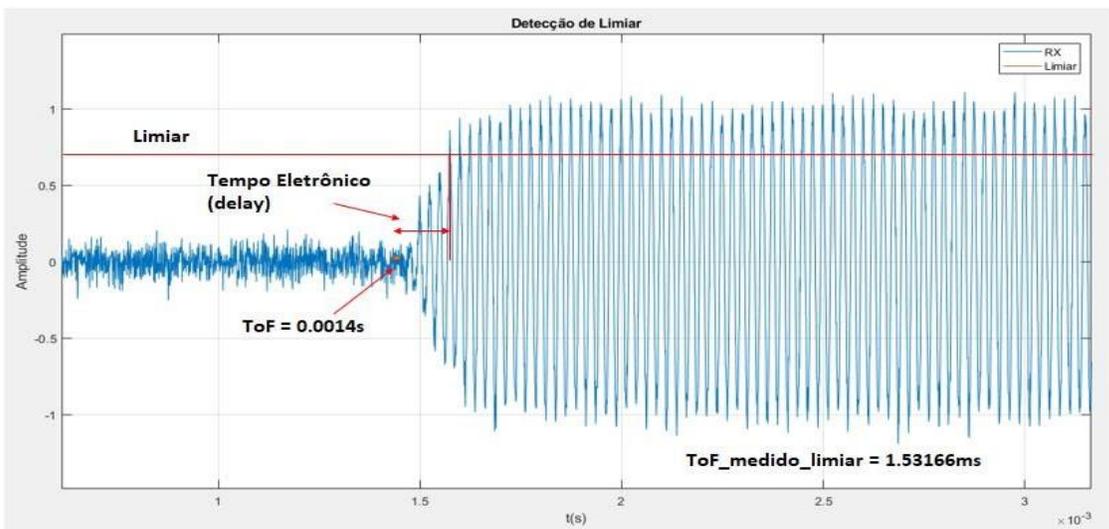


Figura 36 - Resultado de simulação no Matlab sem a presença de ruído

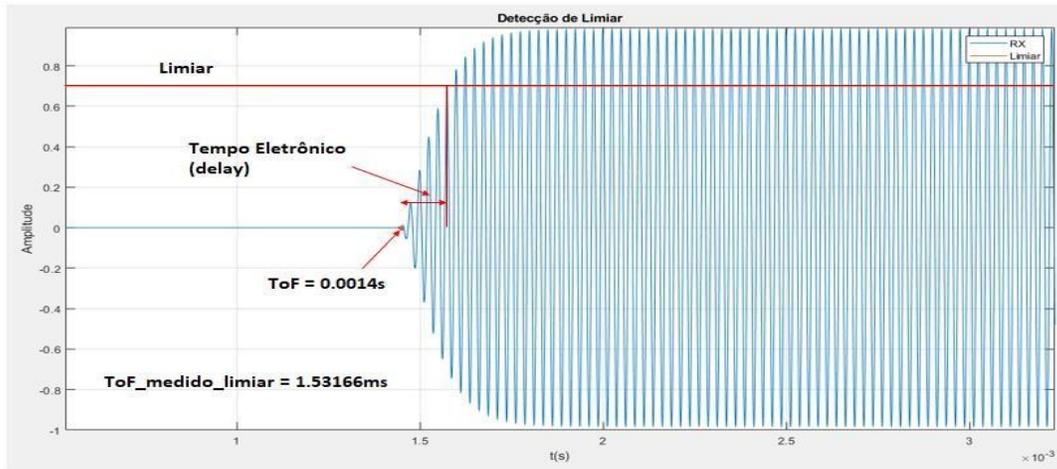


Tabela 2 – Tempo de Trânsito para uma distância de 0.25 m

Distância	Ruído	Média ToF (ms)	Desvio Padrão do ToF (μ s)	Distância estimada (cm)	Desvio Padrão da distância (cm)
0.25m	0.0005	1.4	7.6174	25.03	0.13
	0.0001	1.4	7.5645	25.03	0.13
	0.005	1.4	10.078	24.90	0.17
	0.04	1.1	456.9	19.61	7.92
	0	1.4	0	25	0

- Para uma distância de 0.5 m, o tempo eletrônico é calculado a seguir:

$$\text{Tempo delay} = \text{ToFmedido}_{\text{limiar}} - \text{ToF} = 131.65 \mu\text{s}$$

Figura 37 - Para um ruído = 0.0001

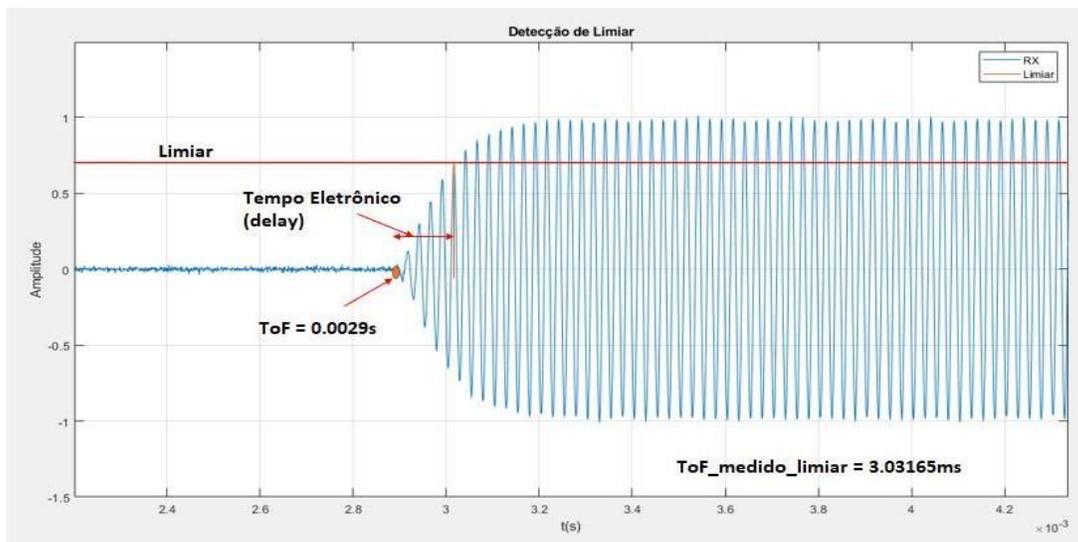


Figura 38 - Para um ruído = 0.005

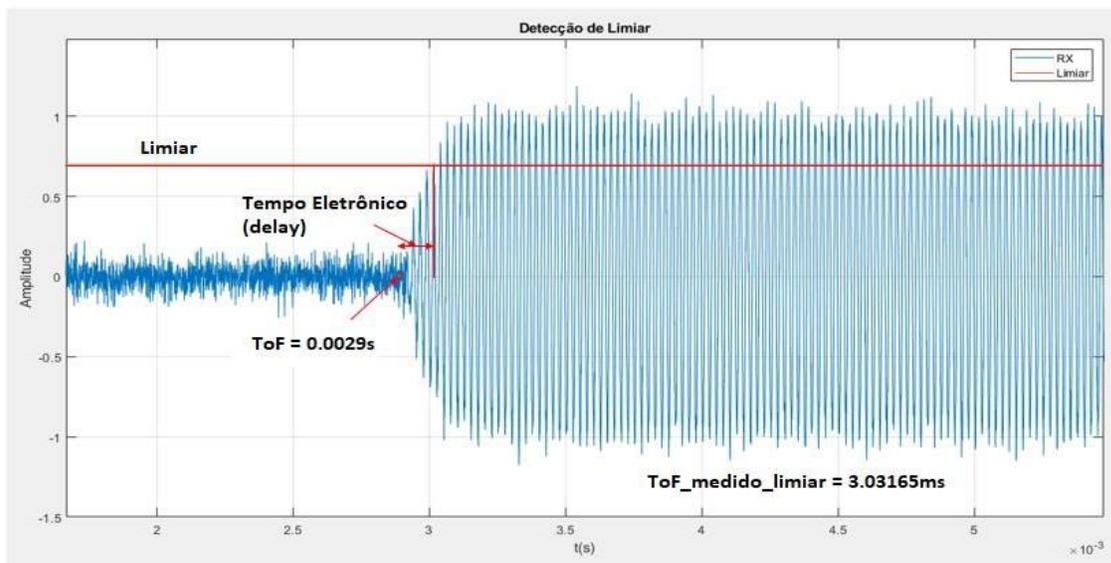


Figura 39 - Para um ruído = 0.04

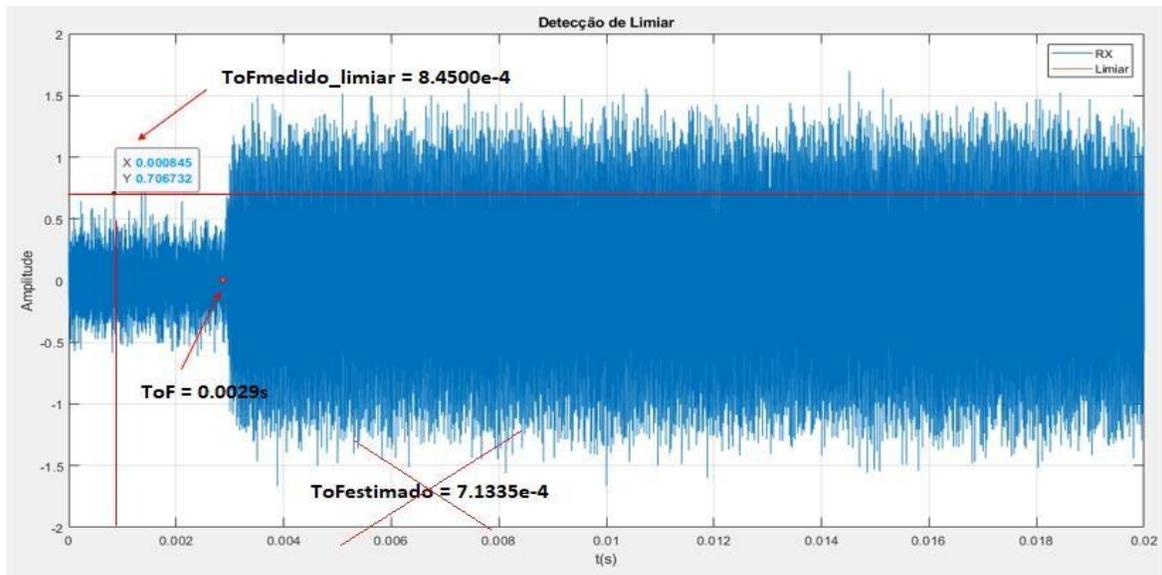


Figura 40 - Resultado no Matlab sem a presença de ruído

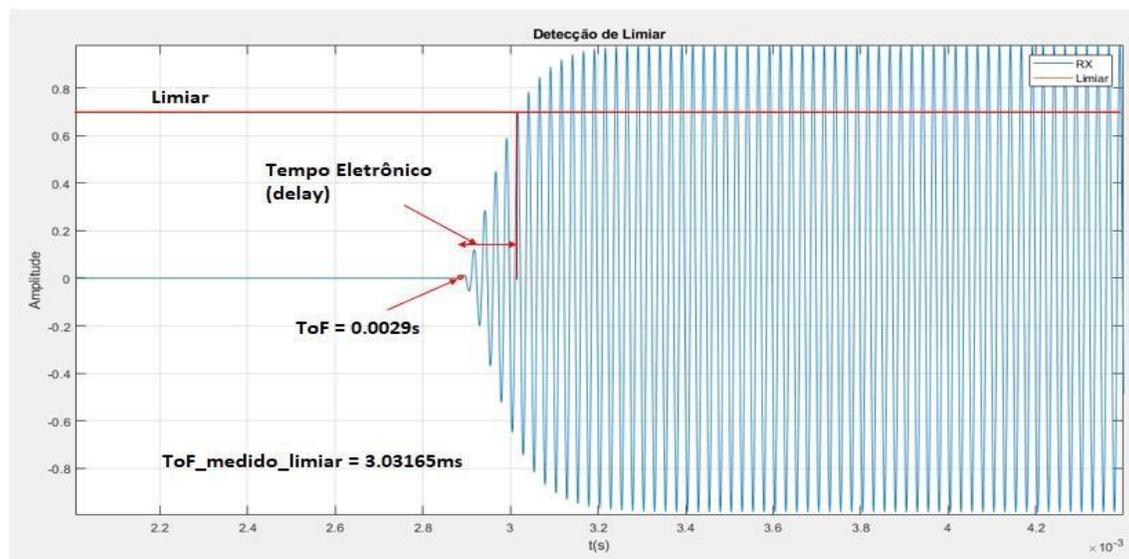


Tabela 3 - Tempo de Trânsito para uma distância de 0.5 m

Distância	Ruído	Média ToF (ms)	Desvio Padrão do ToF (μ s)	Distância estimada (cm)	Desvio Padrão da distância (cm)
0.5m	0.0005	2.9	11.285	50.12	0.2
	0.0001	2.9	12.477	50.20	0.22
	0.005	2.9	0.86066	49.93	0.015
	0.04	2.0	1100	35	18.72
	0	2.9	0	50	0

- Para uma distância de 1 m, o tempo eletrônico: $Tempo\ delay = 131.63\ \mu s$

Figura 41 - Para um ruído = 0.0001

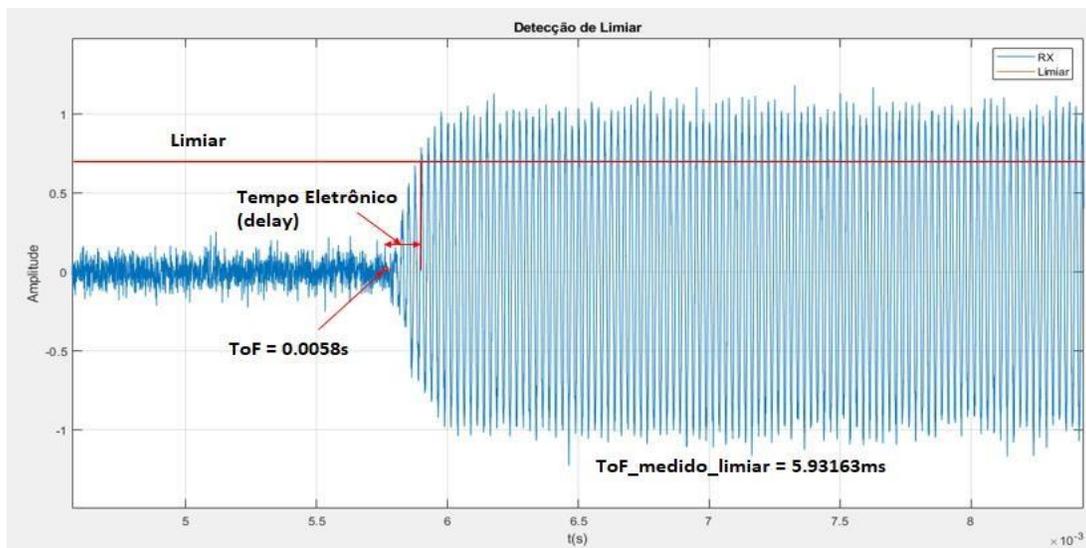


Figura 42 - Para um ruído = 0.005

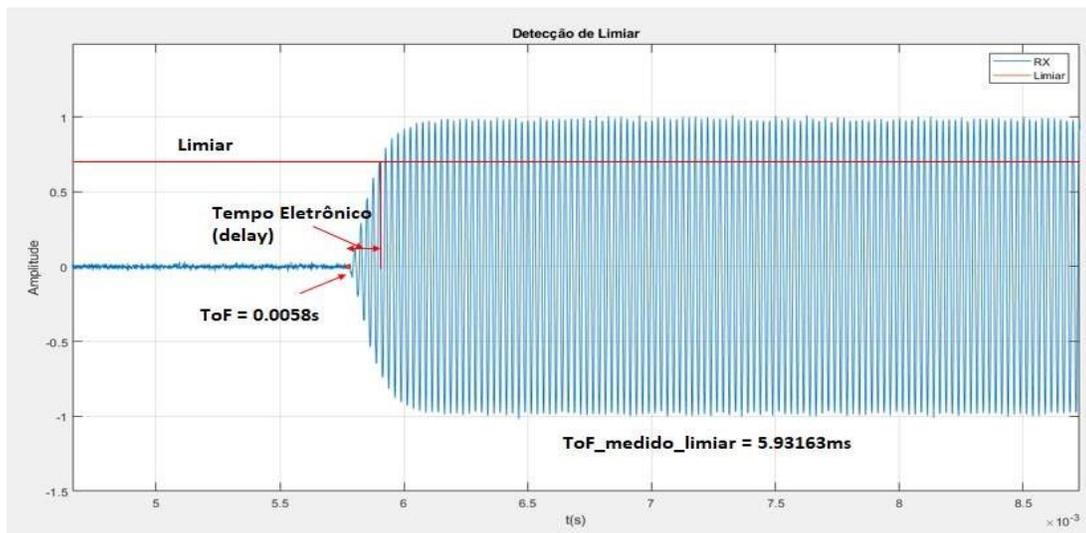


Figura 43 - Para um ruído = 0.04

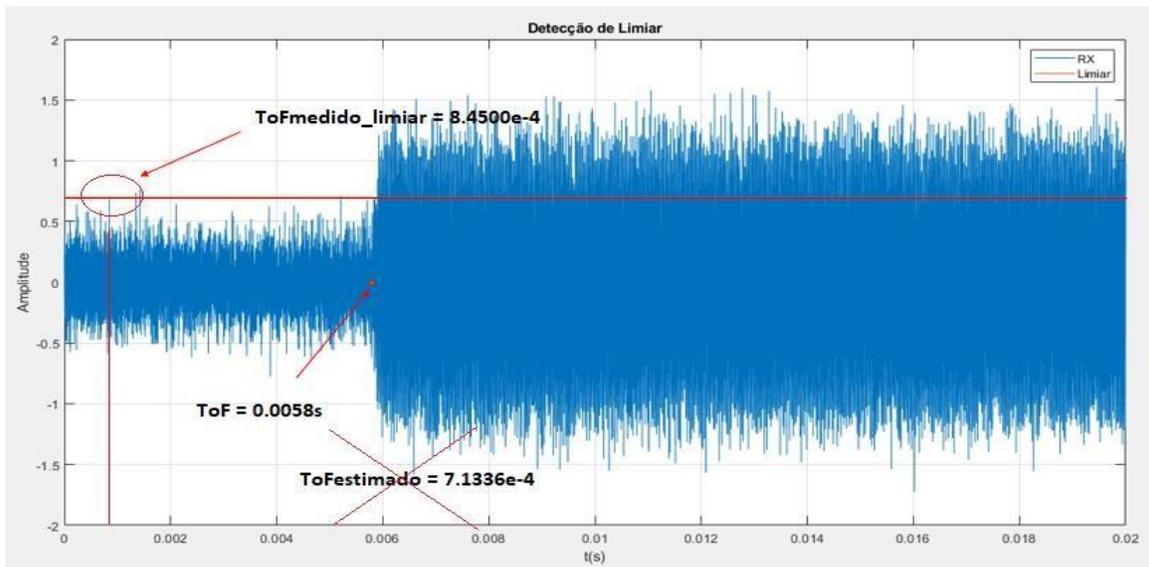


Figura 44 - Resultado da simulação sem a presença de ruído

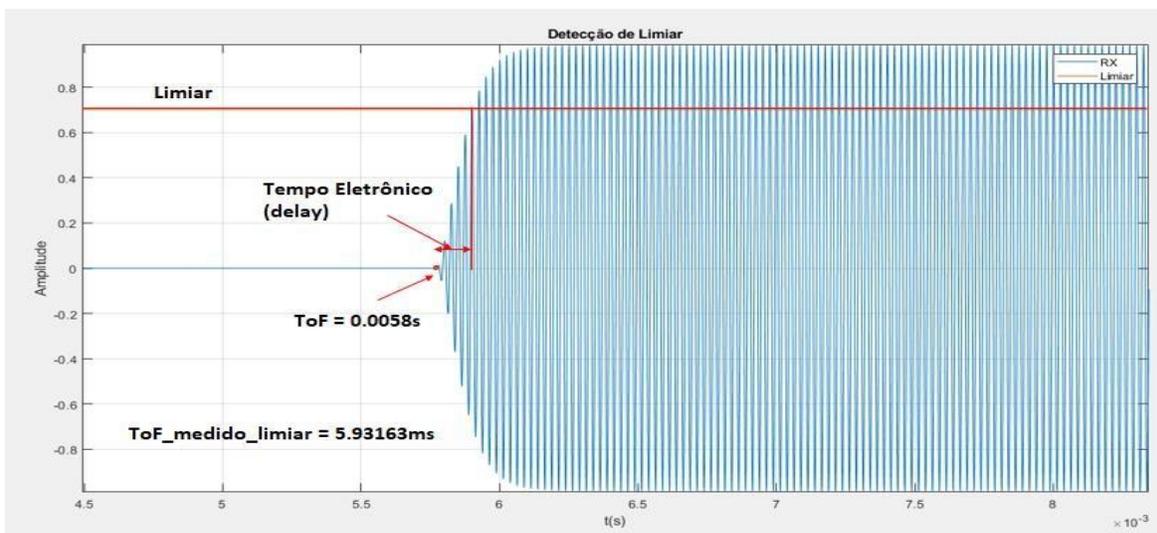


Tabela 4 - Tempo de Trânsito para a distância de 1 m

Distância	Ruído	Média ToF (ms)	Desvio Padrão do ToF (μ s)	Distância estimada (cm)	Desvio Padrão da distância (cm)
1m	0.0005	5.8	9.8855	100.08	0.17
	0.0001	5.8	9.8855	100.08	0.17
	0.005	5.8	7.9781	99.94	0.14
	0.04	3.3	2200	56.43	38.75
	0	5.8	0	100	0

Nas simulações foi considerado o ruído sendo introduzido antes do transdutor receptor para evitar que a detecção com o limiar seja feita de forma antecipada.

4.4 Resultados do método da Detecção de Limiar utilizando a Transformada Wavelet

Com a detecção de limiar, não sendo mais aceitável para determinado nível de ruído, as simulações agora serão realizadas através da Transformada Wavelet com o uso do aplicativo mostrado na Figura 45 e na Figura 46 se exibe o aplicativo ao qual utilizamos o Wavelet 1D.

Figura 45 - Ilustração do aplicativo no Matlab

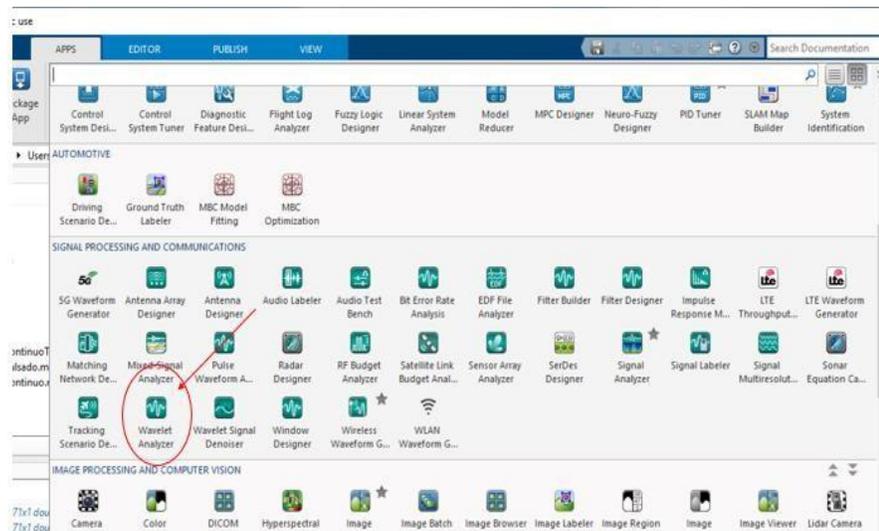


Figura 46 - Aplicativo Analyzer Wavelet



Após a simulação na detecção de limiar se salva o sinal recebido que é a variável Rx, onde vamos aplicar no aplicativo. Fazendo o carregamento da variável como mostra na Figura 47.

Figura 47 - Carregamento da variável no aplicativo



Depois do carregamento da variável, colocamos a família ao qual foi comentada na seção 2.4.8 e analisamos os coeficientes de aproximação e de detalhe (Figura 48). E, por fim, exportamos esses coeficientes para comparar com o sinal original (Figura 49). Esse procedimento é realizado para as distâncias de 0.25 m, quanto para 0.5 m e 1 m.

Figura 48 - Família db6 com 3 níveis

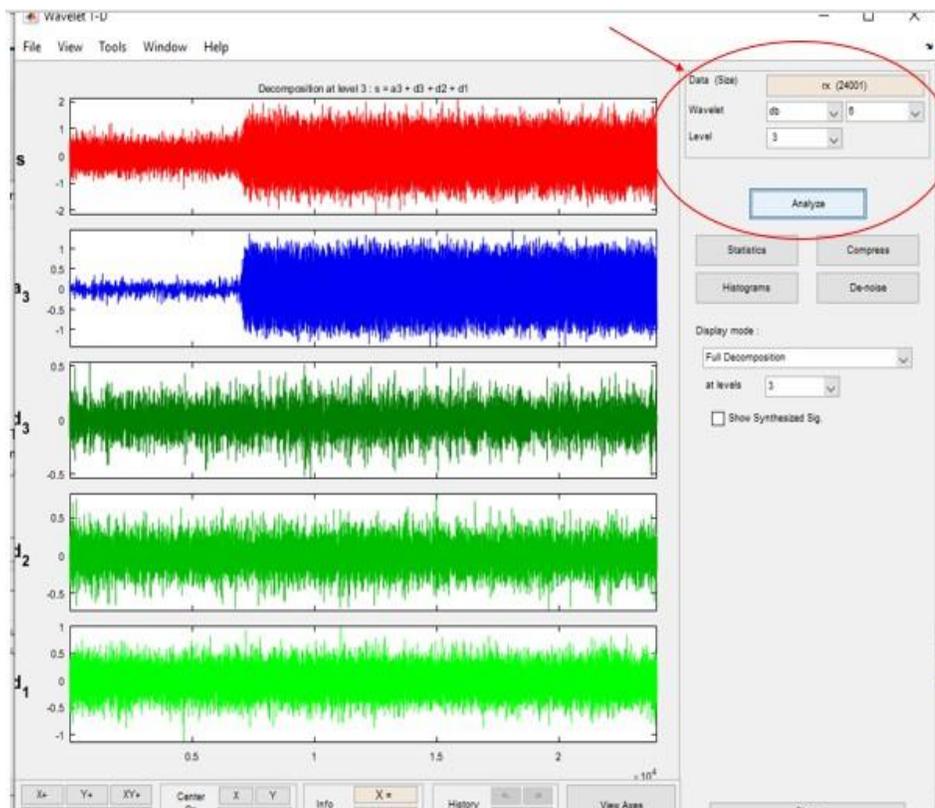
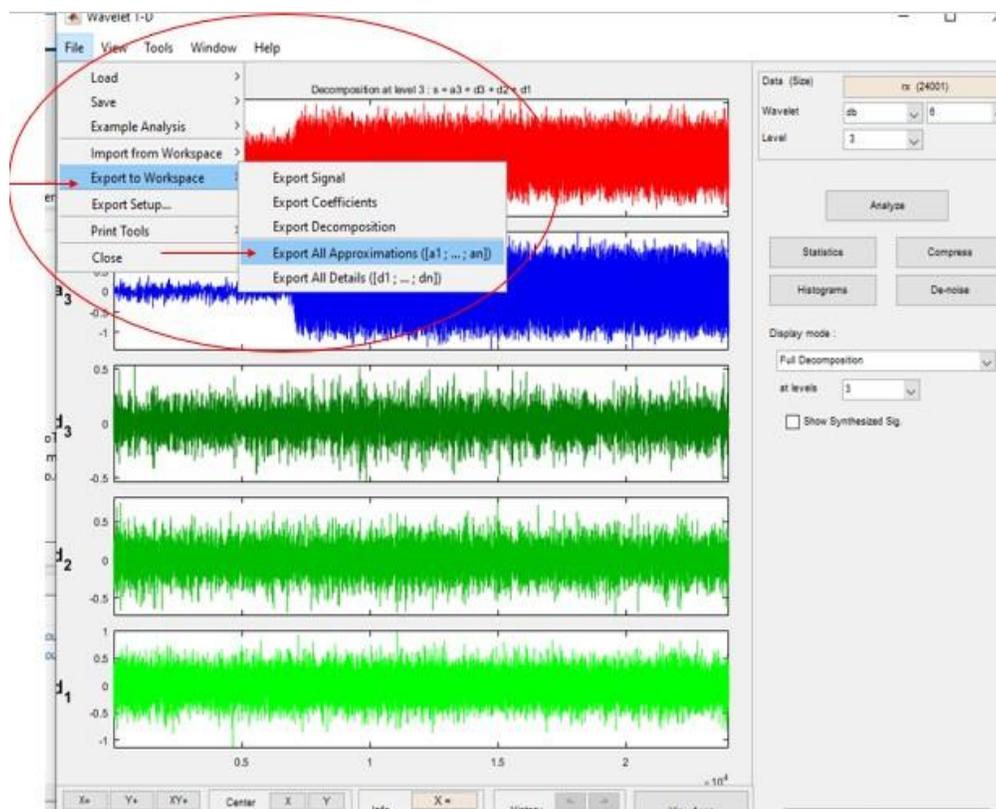


Figura 49 - Exportando os coeficientes



Percebemos pelos gráficos 34, 39 e 43 que o método da detecção de limiar não é mais adequado para a medição do tempo de trânsito com uma potência do sinal de ruído superior a 0.04, visto que seu tempo de detecção se inicia antes do previsto, quando se ainda está no tempo de transmissão e com isso os resultados obtidos para os ToFs medidos são distintos das medições anteriores. Uma solução para um sinal com esse nível de ruído é utilizando a Transformada Wavelet, ao qual foi realizada nas simulações seguintes.

Essa solução se consistia em salvar a variável do transdutor receptor (RX) e utilizando o aplicativo *Analyzer Wavelet* se pôde obter seus respectivos coeficientes de aproximação e de detalhamento e foi adicionado a Transformada Wavelet no código presente da Detecção de Limiar no Matlab para a utilização dos coeficientes obtidos através do aplicativo.

- Para uma distância de 0.25 m:

As ondas sonoras viajam no meio ar muito ineficazmente. Perdem progressivamente a intensidade do sinal à medida que aumenta a distância de separação entre os transdutores de ultrassom. A este fenômeno dá-se o nome de atenuação. Assim, a atenuação ou perda de intensidade da onda sonora ocorre rapidamente no meio ar. Esta

atenuação ocorre devido a dispersão espacial e a dissipação de energia da onda ultrassônica no meio (JIANG, 2011), que ocorre devido a vibração das moléculas no meio de propagação. Analisando a Figura 50, por exemplo, podemos perceber a existência da atenuação presente no sinal, é o mesmo que acontece nos gráficos 51 ao 56.

Nos gráficos 50 ao 56 y é o sinal RX e o yfiltrado é o sinal RX passado pela filtragem da Transformada Wavelet.

Figura 50 - Com ruído = 0.04

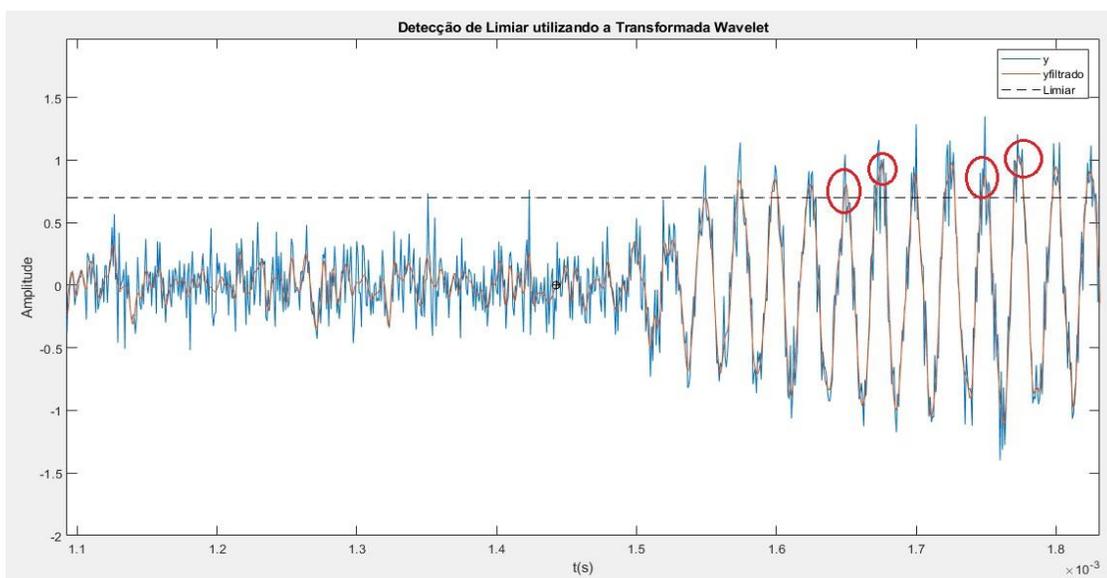


Figura 51 - Com ruído = 0.07

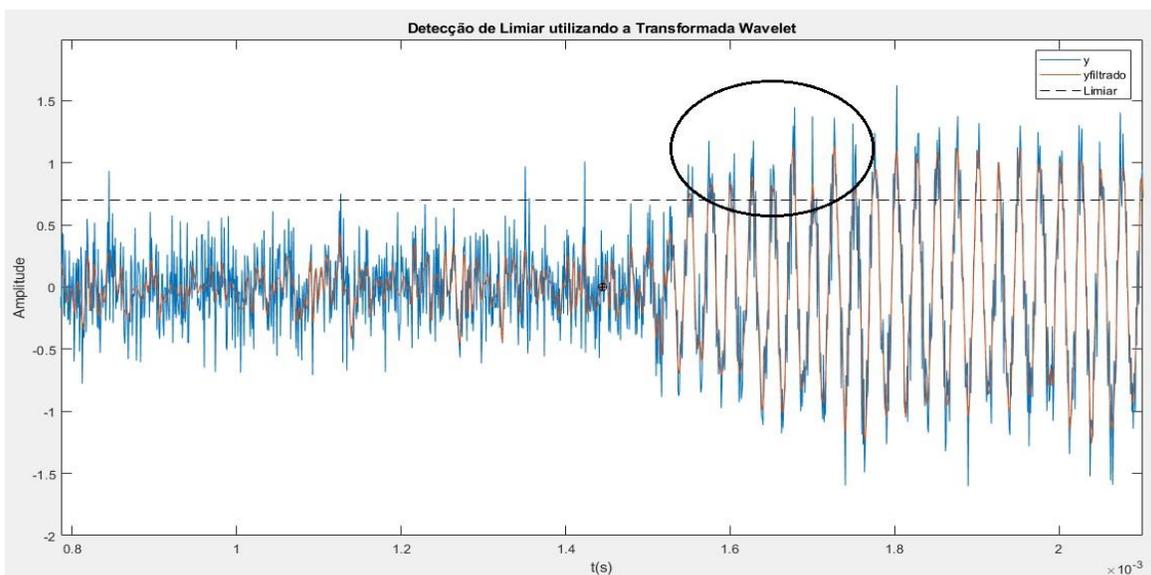
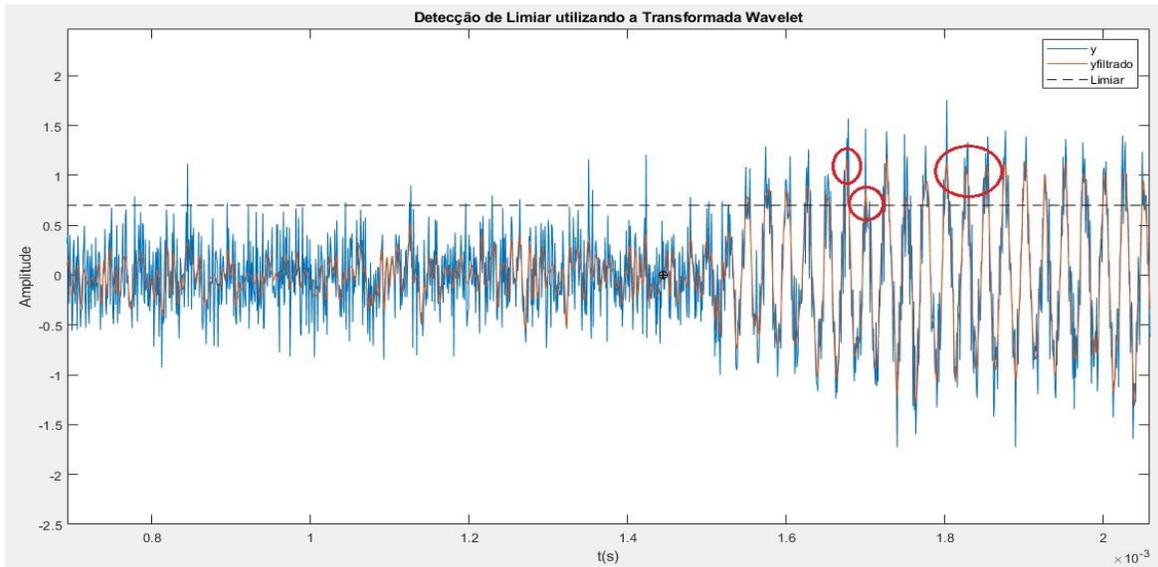


Figura 52 - Para um ruído = 0.1



Através da Tabela 5 podemos perceber que com o aumento do nível de ruído a distância em pelo método de Limiar não funciona mais para medir a distância, mas realizando a Transformada Wavelet nesse sinal correspondente é sim possível realizar a medição da distância e a mesma proposta se percebe nas Tabelas 6 e 7.

Tabela 5 - Estimção da distância para a Detecção de Limiar e Transformada Wavelet para uma distância de 0.25m

Distância	Ruído	ToF teórico (ms)	ToF_limiar_TW (ms)	Distância Limiar (cm)	Distância Lmiar_TW (cm)
0.25m	0.04	1.5	1.6	26.81	27.27
	0.06	0.3275	1.6	5.68	27.70
	0.07	0.58917	1.6	10.21	27.25
	0.09	0.03	1.6	0.52	28.12
	0.1	0.26333	1.6	4.56	28.54

- Para uma distância de 0.5 m:

Figura 53 - Para um ruído = 0.04

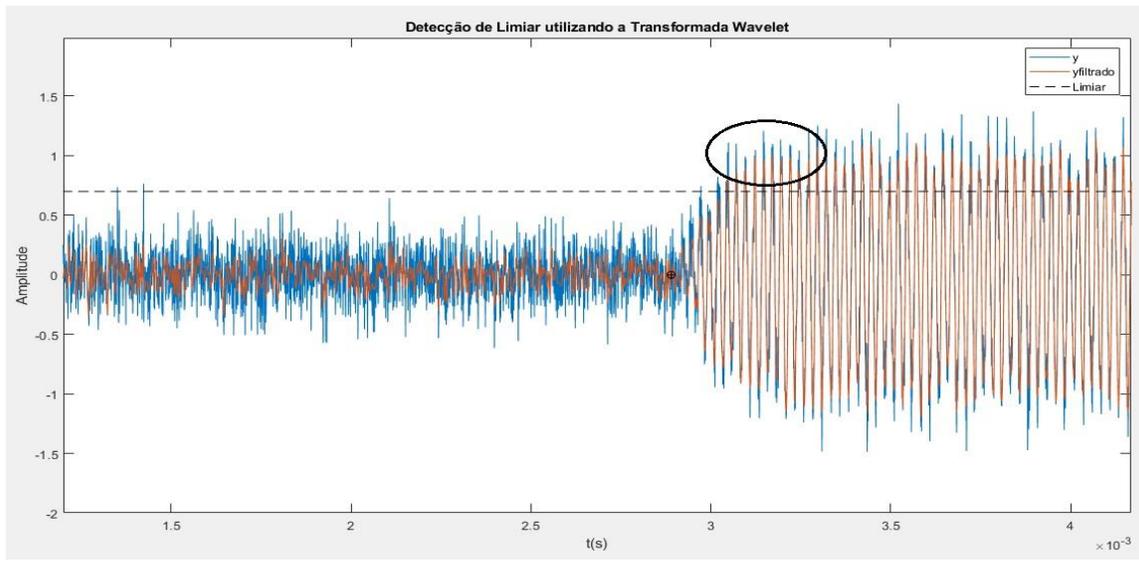


Figura 54 - Para um ruído = 0.07

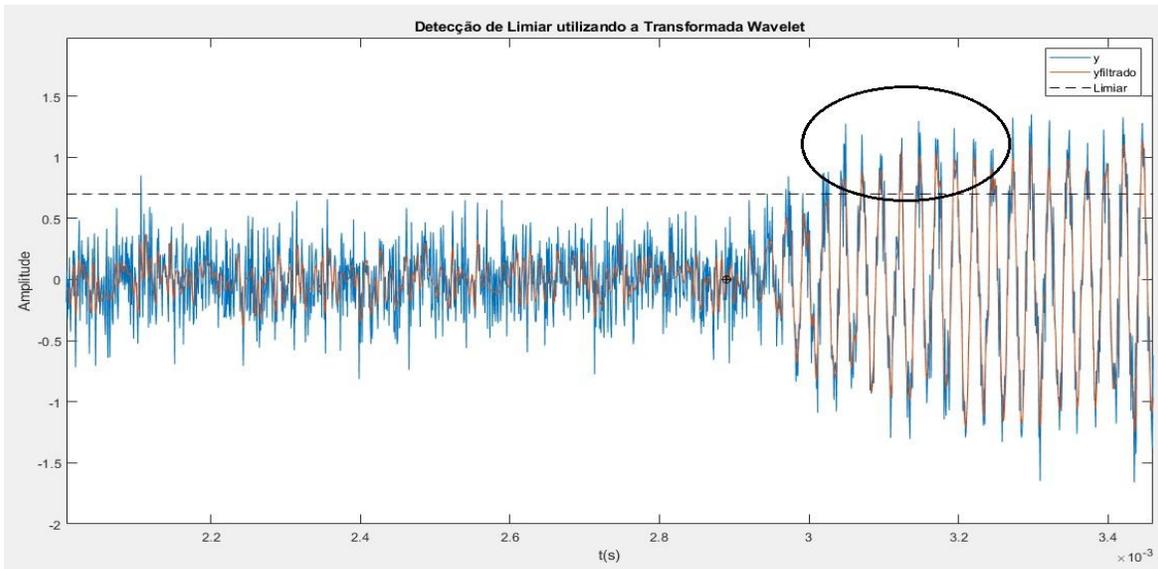


Figura 55 - Para um ruído = 0.1

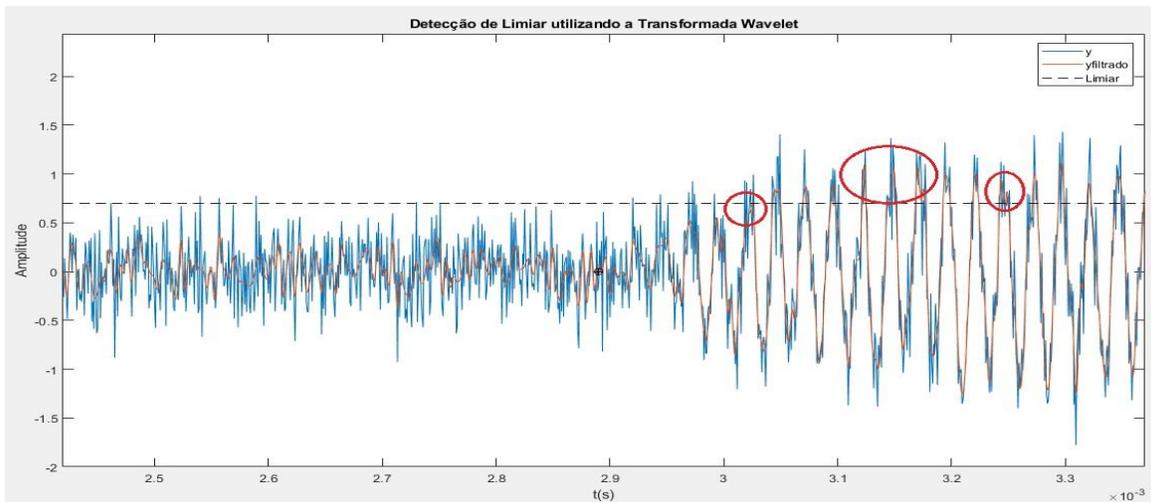


Tabela 6 - Distância para o método da Detecção de Limiar e da Transformada Wavelet para uma distância teórica de 0.5 m

Distância	Ruído	ToF teórico (ms)	ToF_limiar_TW (ms)	Distância Limiar (cm)	Distância Limiar_TW (cm)
0.5m	0.04	3	3	51.4	52.7
	0.06	0.0725	3	1.26	51.83
	0.07	19.75	3	3.42	52.66
	0.09	0.085833	3	1.49	52.27
	0.1	0.03333	3	0.58	52.28

- Para uma distância de 1 m:

Figura 56 - Com ruído = 0.04

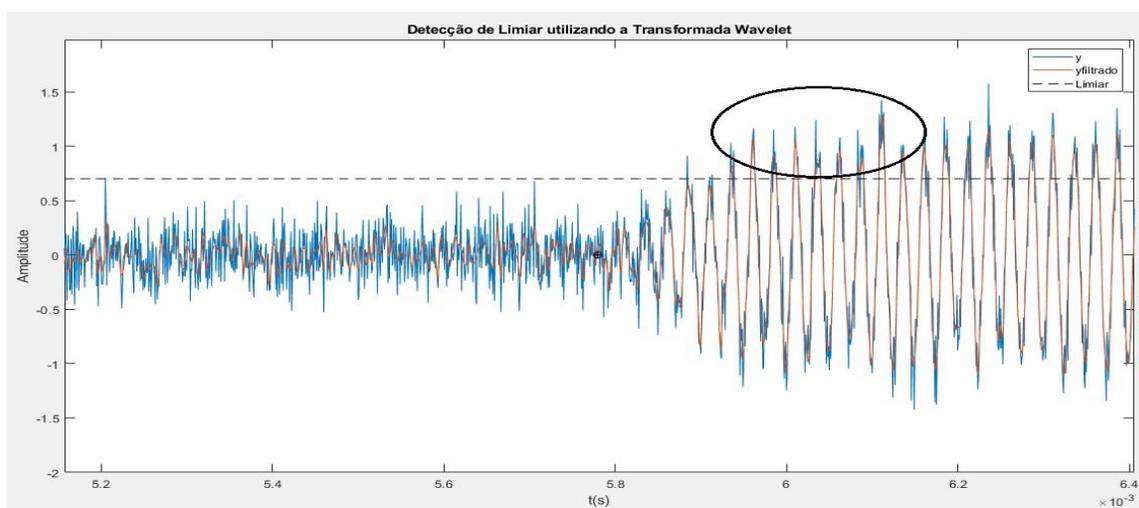


Figura 57 - Com ruído = 0.07

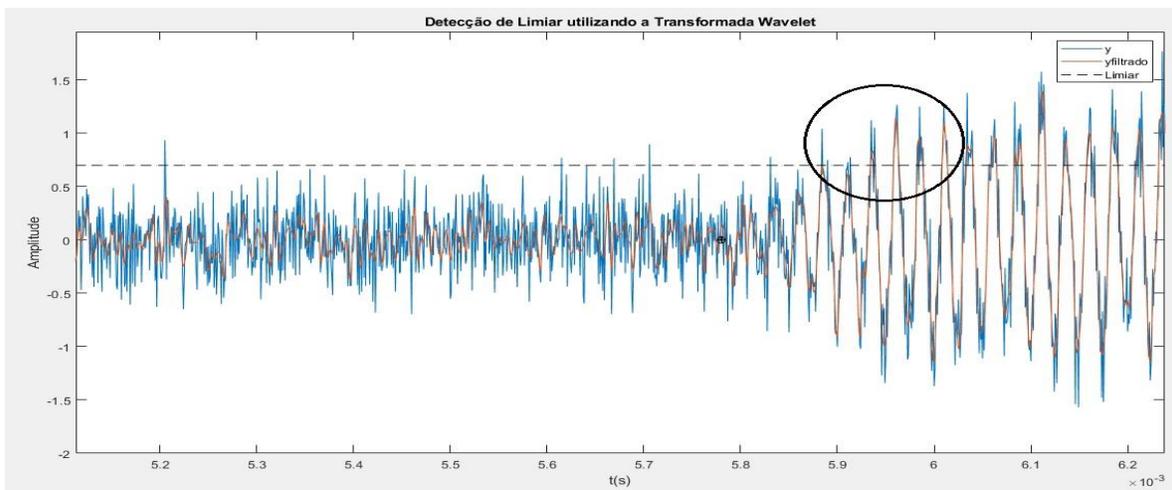


Figura 58 - Com ruído = 0.1

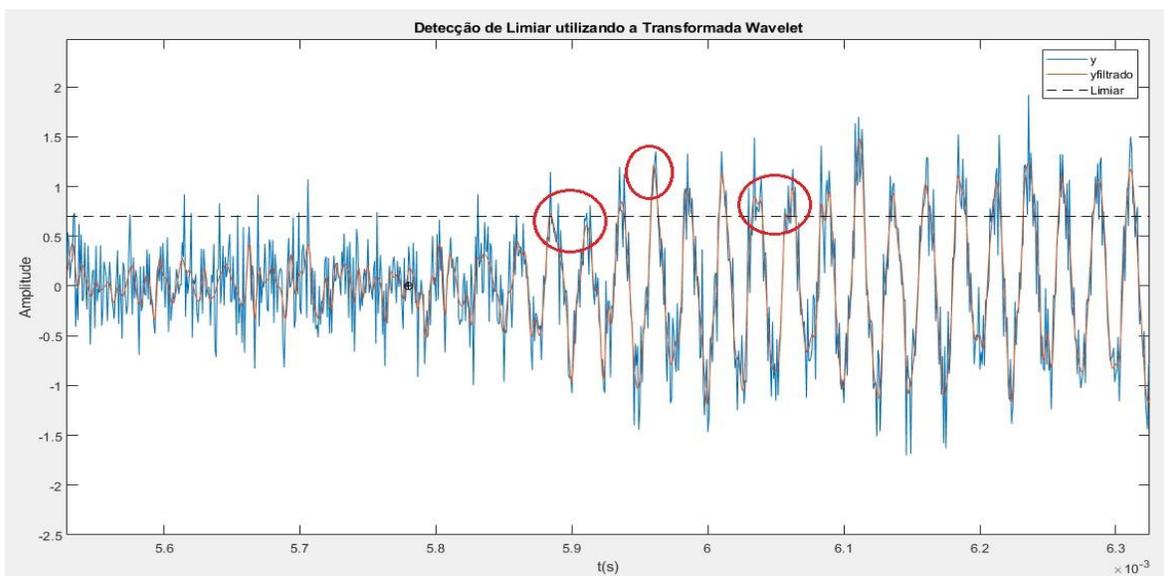


Tabela 7 - Distância para o Método da Detecção de Limiar e da Transformada Wavelet para uma distância teórica de 1 m

Distância	Ruído	ToF teórico (ms)	ToF_limiar_TW (ms)	Distância Limiar (cm)	Distância Lmiar_TW (cm)
1m	0.04	1.1	5.9	18.53	102.25
	0.06	0.1325	5.9	23	102.24
	0.07	0.1825	5.9	3.16	102.25
	0.09	0.14333	5.9	2.48	102.27
	0.1	0.0775	5.9	1.34	102.28

As Tabelas 5, 6 e 7 mostra os resultados obtidos através da TW percebemos que com o nível de ruído aumentando o erro da distância se torna cada vez maior. Esses resultados comprovam a veracidade do método da transformada Wavelet, mesmo com um erro médio de aproximadamente 2.25% ainda assim é possível estimar a distância.

5. Conclusões e Trabalhos Futuros

5.1 Conclusões

Primeiramente, realizamos um estudo sobre o método da Detecção de Limiar (TH) e da Transformada Wavelet (TW), onde observamos sua sensibilidade ao ruído e a temperatura.

Analisou-se através de simulação pelo Matlab qual wavelet-mãe se iria usufruir nas simulações presentes nos resultados.

Verificamos que com um certo nível de ruído (0.04) o método da Detecção de Limiar não condiz com o resultado da distância esperado, mas com a Transformada Wavelet se encontra uma solução que com os níveis de ruído utilizado nas simulações ainda se obtém um erro médio de aproximadamente 2.25%. Podemos dizer que com a Transformada Wavelet obtém-se uma incerteza menor da distância em relação ao Limiar, mas mesmo assim há uma certa perda de sinal quando a recepção é feita.

5.2 Trabalhos Futuros

Estudo de outras técnicas de fusão de dados para a estimação do Tempo de Trânsito ultrassônico, como a análise da Transformada de Fourier, a Correlação Cruzada e o Filtro de Kalman para verificar sua sensibilidade e a maior precisão da Transformada Wavelet.

Realizar a parte da instrumentação para a medição da distância utilizando com base os circuitos presentes no Anexo A.

Referências

- Cardoso, J. T.; Filho, C. A. S. **Development of a didactic ultrasonic level sensor through a modular approach**. COBENGE. Fotalenza – CE, setembro de 2019.
- Camargo, V. L. A. **Elementos de Automação**. Controle de Processors Industriais Série Eixos, 2013.
- CHUI, C. K. **An Introduction to Wavelets**. San Diego: Academic Press, 1992.
- CRUZ, J. N. **Monitoramento de desgaste de correia transportadora utilizando transdutores ultrassônicos**. João Pessoa – Paraíba, 2018.
- Costa, M. M. **Medição de velocidade de vento utilizando transdutores ultrassônicos baseado na Transformada de Fourier**. Campina Grande – Paraíba, março de 2015.
- DAUTOV, Ç. P.; ÖZERDEM, M. S. **Wavelet Transform and Signal Denoising using Wavelet Method**. Conference Paper, 2018.
- Delfino, C. **Análise de Wavelets**. PUC – Rio. Rio de Janeiro, 14 de Janeiro de 2020.
- FILHO, A. R. D. N. **Aplicação de técnicas de dados e ferramentas de IoT em um sistema de medição de nível por ultrassom**. João Pessoa – Paraíba, 2020.
- GUETBI, C.; KOUAMÉ, D.; CHELMA, J. P. **Flow velocity estimation using ultrasound signals and wavelet transformation**. L. Bensaada - Institut des telkcommunications Oran, Algerie, França, 1998.
- GRIMALDI, D. **Time-of-Flight measurement of ultrasonic pulse echoes using Wavelet networks**. IEEE Transactions on instrumentation and measurement, Vol. 55, NO. 1, february 2006.
- HAUPTMANN, P.; HOPPER, N.; PUETTNER, A. IEE **Ultrasonic Symposium. Ultrasonic Sensors for Process Industry**. Karlsruhe – Germany, 2001.
- INGAROCA, N. S. C.; VILLANUEVA, J. M. M.; CATUNDA, S. Y. C.; SANTIAGO, J. L.G.; VARGAS, C. E. T. **Multilayer Measuring System and Uncertainty Analysis Using Ultrasonic Sensors with Wavelet Transform**. Faculty of Electric and Electronic Engineering – National University of Engineering – FIEE – UNI, Lima, Peru. Departamento de Engenharia de Eletricidade – Universidade Federal do Maranhão – DEE – UFMA, São Luis, Brazil, 2011.
- INGAROCA, N. S. C.; VILLANUEVA, J. M. M.; CATUNDA, S. Y. C.; FREIRE. R. C. S. **Wid speed measurement method using ultrasonic sensors with stationary wavelet transform**. Faculty of Electric and Electronic Engineering – National University of Engineering – FIEE – UNI, Lima, Peru. Universidade Federal de Campina Grande –

Campina Grande – Brazil. Universidade Federal de Rio Grande do Norte – Natal – Brazil, 2012.

LIU Q.; BAI P.; LUO Z.; ZHANG W.; ZHOU G. (2016). **Blind Area Free Ultrasonic Distance Measurement System**. IEEE International Conference on Signal and Image Processing (ICSIP).

LUCENA, D. C.; FREIRE, R. C. S.; VILLANUEVA, J. M. M.; LUCIANO, B. A. **Um método ultrassônico inovador de tempo de voo baseado no filtro Kalman estendido para medição do vento**. Publishing Ltd e Sissa Medialab Journal of Instrumentation , Volume 15 , abril de 2020.

MISITI, M. et al. **Wavelet Toolbox**. Versão.1: MathWorks Inc, 1997.

OLIVEIRA, J. I. S. **Medição de múltiplas fases de nível de líquidos usando filtro adaptativo: técnicas, métodos e simulações**. São Luís - Maranhão, 2005.

PÀLLAS-ARENY R., WEBSTER J. (2001), **Sensors and Signal Conditioning**, 2nd Edition, John Wiley and Sons.

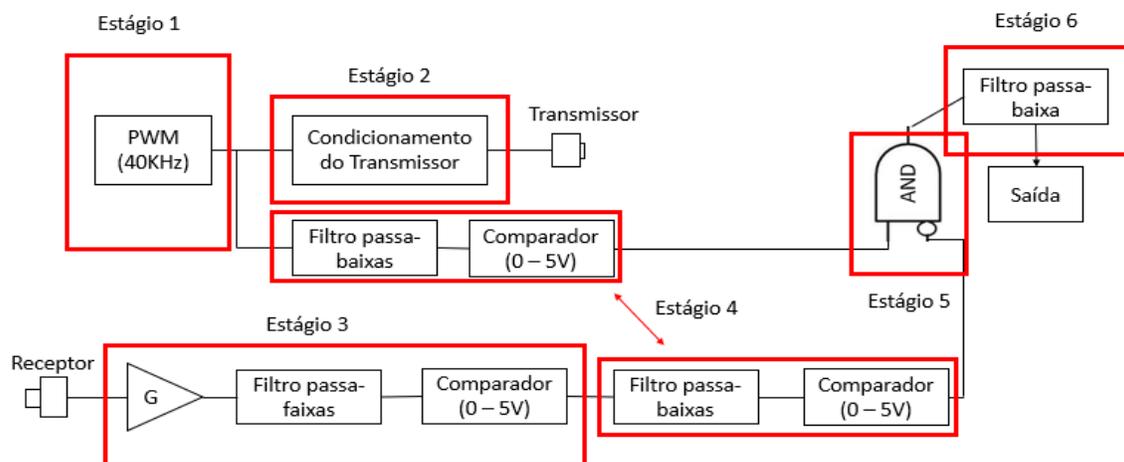
VILLANUEVA, J. M. M. **Fusão de dados das técnicas de tempo de trânsito utilizando transdutores ultrassônicos para medição da velocidade do vento**. Rio de Janeiro, abril de 2009.

YOSHIKAWA Y.; Yasuda Y. ;Shintaro I. Izumi;Kawaguchi H. (2021). **12.5-m Distance Measurement in High-Interference Environment Using Ultrasonic Array Sensors**. IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC).

ANEXOS

ANEXO A – Estrutura do projeto das placas

Com a metodologia encontrada no artigo (Cardoso, J. T.; Filho, C. A. S.), para uma melhor compreensão, o processo de condicionamento do sensor foi dividido em algumas fases representadas no diagrama de blocos mostrado abaixo:



Estágio 1:

Para que o sensor funcione corretamente, é necessário gerar um sinal de PWM com frequência conhecida. O sinal possui a função de ativação quando os 40KHz do sinal está presente no transdutor que emite transmite a onda.

Estágio 2:

O circuito de condicionamento do transmissor foi alimentado com uma tensão de 5V durante sua simulação. O sinal PWM não consegue fornecer corrente suficiente para que o transmissor funcione corretamente, tornando necessária a utilização de um sistema de acionamento atual, nesse caso, uma topologia push-pull foi implementado que irá drenar a corrente mínima necessária para o bom funcionamento do transdutor.

Estágio 3:

O tempo de retorno é medido quando a voltagem do receptor atinge um nível pré-determinado. O sinal do receptor deve ser medido e comprovar o comportamento senoidal. Para eliminar o ruído e garantir que o sinal está a vir do emissor foi utilizado um filtro passa-faixa com uma frequência central a 40 kHz.

Estágio 4:

O sinal do receptor estará atrasado em relação ao sinal do transmissor. Essa diferença dos dois sinais é o tempo eletrônico.

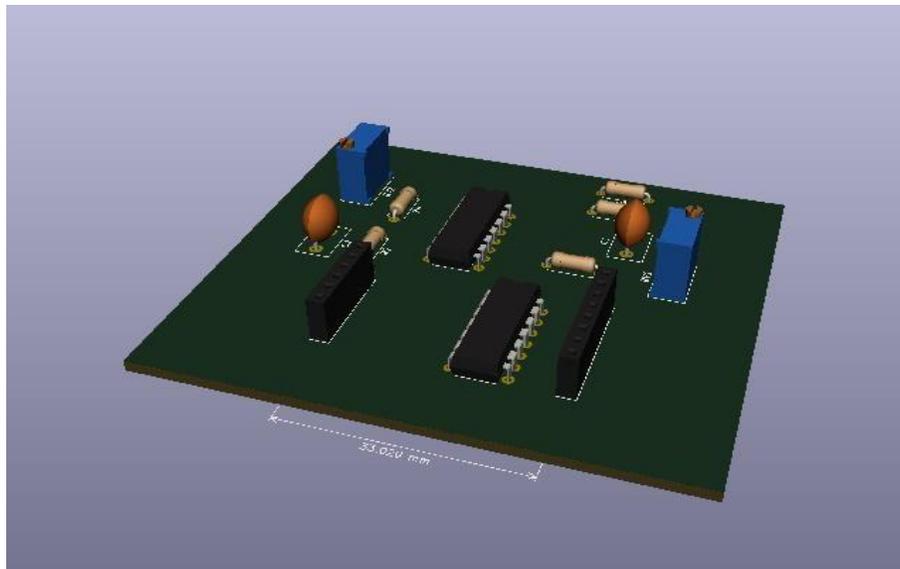
Estágio 5:

Para se obter um sinal condicionada será necessário utilizar uma lógica que garanta que quando o transmissor estiver em nível lógico alto e o receptor em nível lógico baixo, a saída fique em nível lógico alto. Para tanto, será utilizado uma porta lógica NOT e uma porta AND.

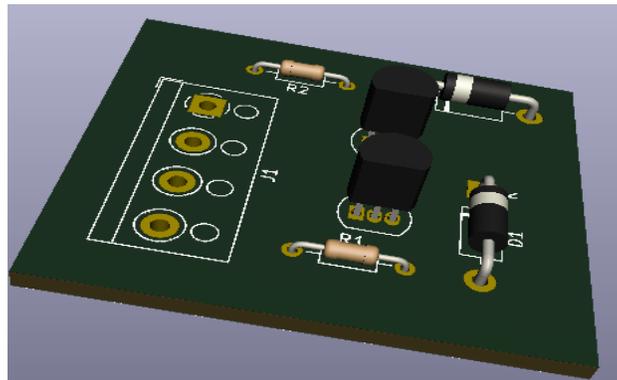
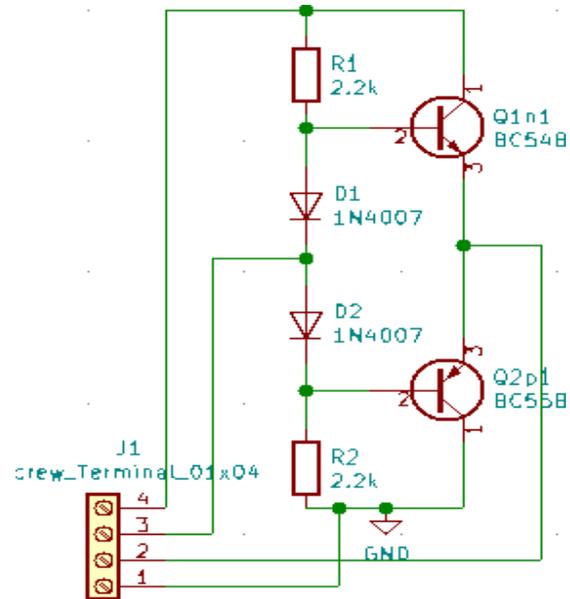
Estágio 6:

Serão necessários também filtros passa-baixa (com frequência bastante inferior a frequência de 40 kHz) com suas saídas ligadas em comparadores para que seja possível transformar os N pulsos do PWM em um único pulso, de forma que possibilite utilizar as portas lógicas.

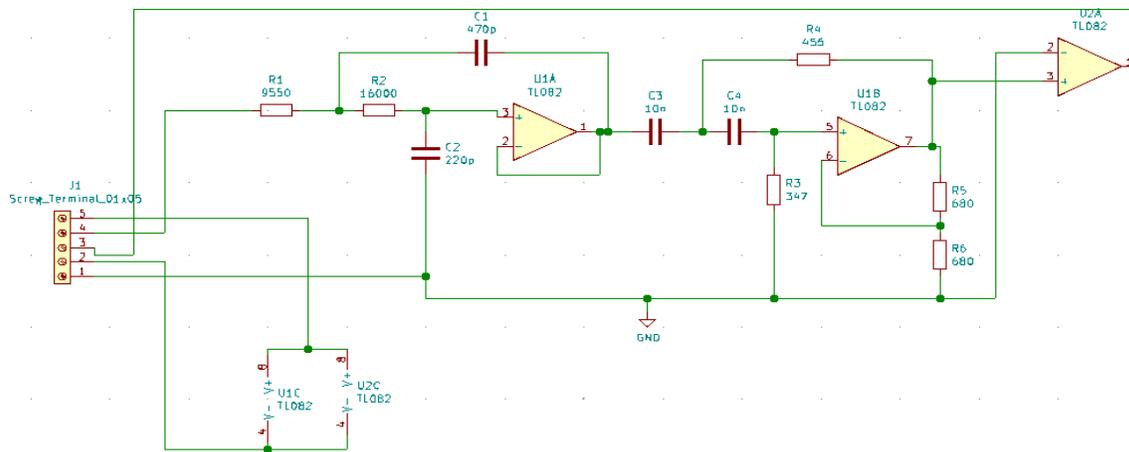
ANEXO A 1 – Estágio 1: Oscilador 40 KHz

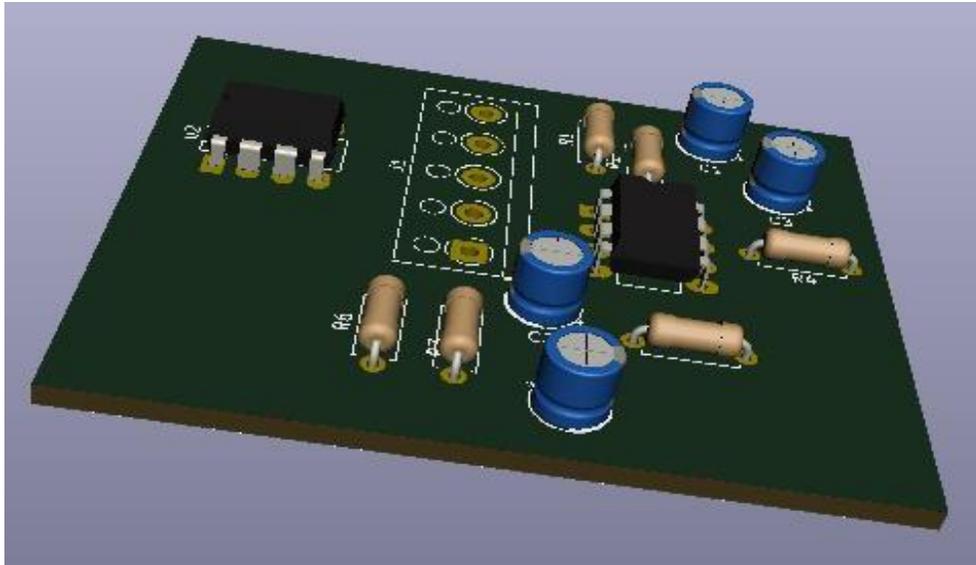


ANEXO A 2 – Estágio 2: Amplificador push-pull

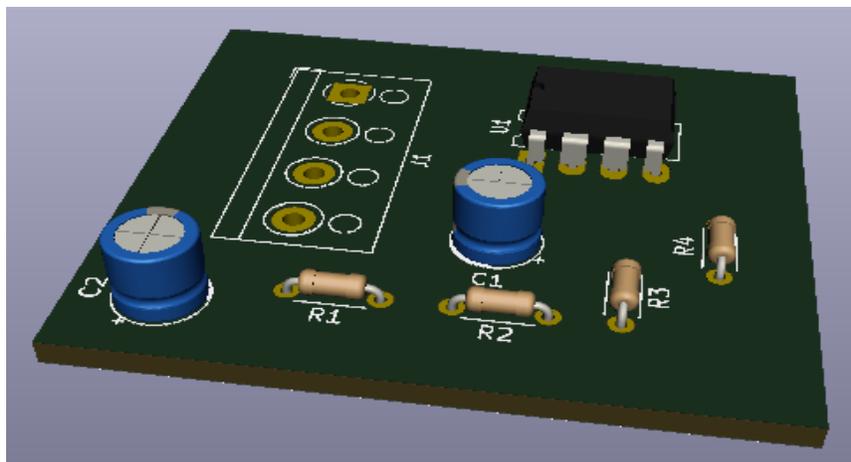
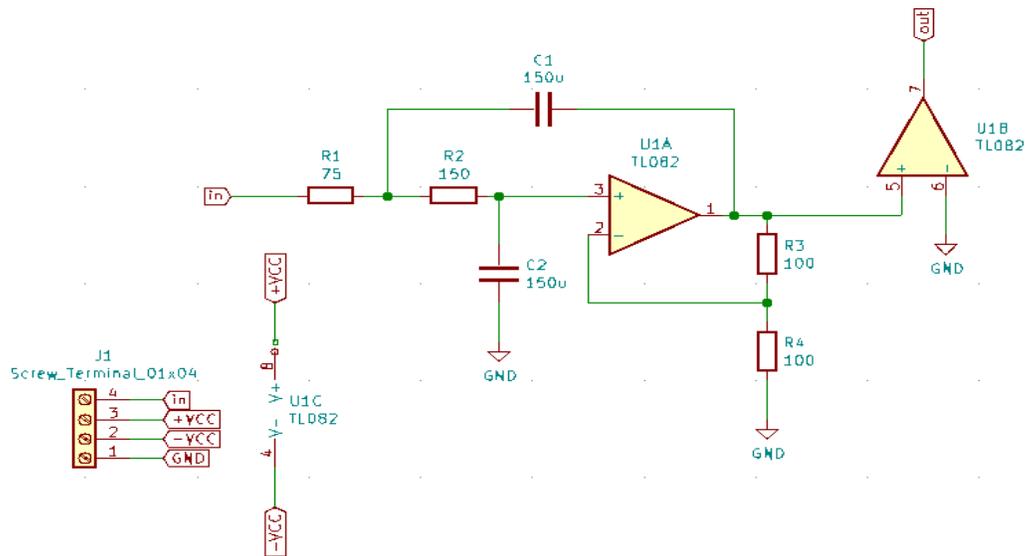


ANEXO A 3 – Estágio 3: Filtro passa-faixa

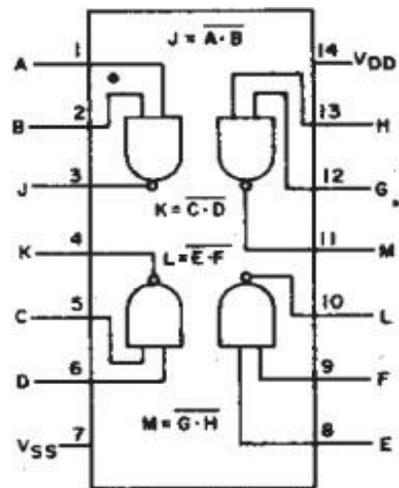
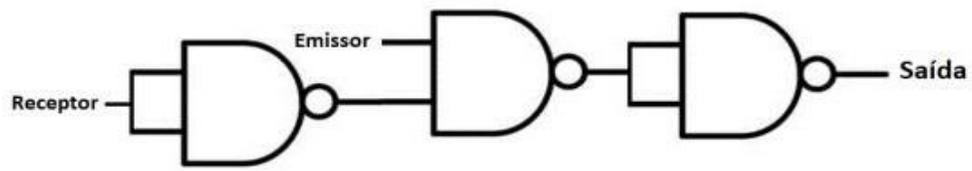




ANEXO A 4 - Estágio 4: Filtro passa-baixa + comparador



ANEXO A 5 – Estágio 5: Porta AND



92CS-24763

CD4011B

ANEXO A 6 – Estágio 6: Filtro passa-baixa

