

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELETRÔNICA

GABRIEL KRAUSE DE QUADROS

**PLATAFORMA DE ULTRASSOM ABERTA DE 8 CANAIS COM  
ACESSO AOS DADOS RAW**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2018

**GABRIEL KRAUSE DE QUADROS**

**PLATAFORMA DE ULTRASSOM ABERTA DE 8 CANAIS COM  
ACESSO AOS DADOS *RAW***

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento Acadêmico de Eletrônica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Professor Dr. Flavio Neves Junior

Co-orientador: Professor Dr. César Yutaka Ofuchi

**CURITIBA**

**2018**

GABRIEL KRAUSE DE QUADROS

**PLATAFORMA DE ULTRASSOM ABERTA DE 8 CANAIS COM  
ACESSO AOS DADOS RAW**

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletrônico, do curso de Engenharia Eletrônica do Departamento Acadêmico de Eletrônica (DAELN) outorgado pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). O aluno Gabriel Krause de Quadros foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Curitiba, 28 de junho de 2018.

---

Prof. Dr. Robinson Vida Noronha  
Coordenador de Curso  
Engenharia Eletrônica

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Carmen Caroline Raserá  
Responsável pelos Trabalhos de Conclusão de Curso  
de Engenharia Eletrônica do DAELN

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Flavio Neves Junior  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Orientador

---

Prof. Dr. Joaquim Miguel Maia  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Prof. Dr. César Yutaka Ofuchi  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Coorientador

---

Prof. Dr. Guilherme Alceu Schneider  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

A folha de aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Eletrônica.

Aos meus pais, amigos, familiares e a todos aqueles que estiveram me apoiando nesta jornada.

## AGRADECIMENTOS

Eu gostaria de agradecer a colaboração de todos neste projeto que direta ou indiretamente fizeram parte deste trabalho de conclusão de curso:

- Agradeço ao Professor Dr. Flavio Neves Junior pelo seu suporte e disponibilização de equipamento e infraestrutura indispensáveis para a realização do presente trabalho. Suas orientações e críticas foram muito importantes no decorrer desta jornada.
- Agradeço ao Professor Dr. César Yutaka Ofuchi pelo seu apoio e indicações valiosas que contribuíram positivamente para o sucesso deste trabalho durante todas as suas etapas.
- Agradeço ao mestrando Guilherme Massahuru Omi pela amizade, o compartilhamento de informações e a ajuda mútua na realização deste trabalho, ensaios e testes.
- Agradeço aos familiares e amigos pelo constante apoio tanto na parte pessoal quanto profissional e na convicção de meu potencial.
- Agradeço ao apoio financeiro da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP –, da Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP –, do Ministério da Ciência e Tecnologia – MCT – por meio do Programa de Recursos Humanos da ANP para o Setor Petróleo e Gás – PRH-ANP/MCT – e do Programa de Formação de Recursos Humanos da PETROBRAS - PRH10-UTFPR.



Ministério da  
Ciência, Tecnologia  
e Inovação



*“The two most important days in your life are the day you are born and  
the day you find out why.”  
(Mark Twain)*

## RESUMO

KRAUSE DE QUADROS, Gabriel. PLATAFORMA DE ULTRASSOM ABERTA DE 8 CANAIS COM ACESSO AOS DADOS RAW. 74 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharelado em Engenharia Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

A execução de ensaios não-destrutivos através de Ultrassom encontra uma grande gama de aplicações na indústria, bem como na área de pesquisas acadêmicas. Existe uma grande demanda de detecção e avaliação de falhas estruturais em dutos, pontes e outras estruturas feitas de diversos tipos de material. Em um ambiente controlado, pode-se querer determinar propriedades físicas de uma amostra como sua espessura. A utilização do Ultrassom se encaixa bem nesses cenários. Além disso, o uso de métodos não-invasivos como o aqui descrito tem uma grande vantagem comparado com técnicas que envolvem a mudança da estrutura do material. O presente trabalho almeja a implementação de uma plataforma de ultrassom aberta de 8 canais dedicada à pesquisa acadêmica, através do uso de kits de desenvolvimento. A plataforma compreende tanto a parte de transmissão quanto a parte de recepção do sinal ultrassônico. Os dados adquiridos simultaneamente dos oito canais em formato *raw* são salvos em um arquivo binário para *post-processing*. Portanto, parâmetros como amplitude, frequência e largura do pulso podem ser extraídos e manipulados como se desejar. O software MATLAB foi usado para conduzir a análise dos dados adquiridos e mostrar os resultados. Isto não seria possível com uma plataforma de ultrassom proprietária. Infelizmente, é o tipo mais comum de sistema de ultrassom encontrado no mercado. Este fato restringe a pesquisa no campo acadêmico. Desse modo, este trabalho é focado na expansão da pesquisa em ensaios não-destrutivos através de uma plataforma aberta, assim como inspirar trabalhos futuros no escopo da Pesquisa e Desenvolvimento.

**Palavras-chave:** inspeção, estruturas, ensaios não-destrutivos, amostra, plataforma aberta

## ABSTRACT

KRAUSE DE QUADROS, Gabriel. 8-CHANNEL ULTRASOUND SYSTEM WITH RAW DATA ACCESS. 74 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharelado em Engenharia Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

The performing of nondestructive tests through ultrasound finds a broad range in the industry, as well as in the field of academic research. There is a great demand for detection and assessment of structural flaws in pipes, bridges and other structures made of several types of materials. In a controlled environment, you may want to determine physical properties of a specimen such as its thickness. The utilization of ultrasound fits well in these scenarios. On top of that, the use of noninvasive methods as the one described here has a great advantage compared to techniques that involve the change of the material's structure. The present work aims at implementing an 8-Channel Ultrasound Platform dedicated to academic research through the use of development kits. The platform comprises a transmit-side and receive-side signal path. The raw data acquired simultaneously from the eight channels are saved in a binary file for post-processing. Therefore, parameters such as amplitude, frequency and pulse length can be extracted and manipulated to one's desire. The software MATLAB was used to carry out the analysis of the acquired data and display results. This would not be possible with a proprietary ultrasound platform. Unfortunately, it is the most commonly found type of ultrasound system in the market. This fact restricts the research in the academic field. Hence, this work is focused on expanding the research in nondestructive testing through an open platform, as well as inspiring future works in the R&D scope.

**Keywords:** inspection, structures, nondestructive testing, specimen, open platform

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	–	Velocidades de Propagação das Ondas Sonoras	17
FIGURA 2	–	Transdutor de Duplo Elemento e o Caminho do Som	18
FIGURA 3	–	Método Pulso-Eco e sua Representação <i>A-Scan</i>	20
FIGURA 4	–	Ecos Múltiplos em uma Amostra Plano-Paralela	21
FIGURA 5	–	Direcionamento de Feixe e Focalização	22
FIGURA 6	–	Espectro de um Sistema de Ultrassom representado por um Sinal <i>Narrowband</i>	24
FIGURA 7	–	Sinal Chirp Senoidal Linear Modulado em Frequência	25
FIGURA 8	–	Pseudo-Chirp Não Linear Modulado em Frequência	25
FIGURA 9	–	Pulso Barker de 13 bits	27
FIGURA 10	–	Função de Autocorrelação do Pulso Barker de 13 bits	27
FIGURA 11	–	<i>Software</i> TI Ultrasound Tools	30
FIGURA 12	–	<i>Software</i> AFE5805EVM USB SPI	31
FIGURA 13	–	<i>Software</i> High Speed Data Converter Pro	32
FIGURA 14	–	Transdutores Olympus	33
FIGURA 15	–	O Trajeto da Onda Sonora em Formato V do Transdutor de Duplo Elemento	33
FIGURA 16	–	Diagrama do Corpo de Teste de Aço com orifícios pré-definidos	34
FIGURA 17	–	Cilindro de Aço com Suporte para os Transdutores	35
FIGURA 18	–	Kits de Desenvolvimento Empregados na Plataforma	37
FIGURA 19	–	Diagrama em Blocos da Plataforma de Ultrassom	38
FIGURA 20	–	Projeto do Gabinete da Plataforma de Ultrassom	40
FIGURA 21	–	A Plataforma de Ultrassom	41
FIGURA 22	–	Painel Frontal do Chassis	41
FIGURA 23	–	Representação da Configuração do Sistema	42
FIGURA 24	–	Ensaio Pulso-Eco no Contêiner de Acrílico	43
FIGURA 25	–	Ensaio Pulso-Eco no Corpo Cilíndrico de Aço	44
FIGURA 26	–	Configuração do Atraso entre Canais no <i>Software</i> TI Ultrasound Tools	45
FIGURA 27	–	Captura de Tela das Representações <i>A-Scan</i> do Ensaio Submerso	47
FIGURA 28	–	<i>A-Scan</i> de Transmissão do Ensaio da Cuba de Acrílico	48
FIGURA 29	–	<i>A-Scan</i> de Recepção do Ensaio da Cuba de Acrílico	48
FIGURA 30	–	Correspondência do <i>A-Scan</i> com a Cuba Submetida ao Ensaio	49
FIGURA 31	–	Espectro de Frequências do Ensaio da Cuba de Acrílico	49
FIGURA 32	–	O sinal Emitido pelo Pulsador e a Forma de Onda do Transdutor	50
FIGURA 33	–	A Recepção do Eco devido a Pulsos de Excitação com 2, 4, 8 e 16 ciclos	51
FIGURA 34	–	<i>A-Scan</i> do Corpo de Prova	52
FIGURA 35	–	Correspondência do <i>A-Scan</i> com o Corpo de Prova Submetido ao Ensaio	52
FIGURA 36	–	<i>A-Scan</i> de Recepção do Corpo Cilíndrico	53
FIGURA 37	–	Correspondência do <i>A-Scan</i> com o Cilindro Submetido ao Ensaio	54
FIGURA 38	–	Captura de Tela do Osciloscópio demonstrando a configuração <i>Phased Array</i>	55
FIGURA 39	–	Pulsos de Excitação do Arranjo <i>Phased Array</i> 630 kHz	55
FIGURA 40	–	Espectro de Frequências do Arranjo <i>Phased Array</i> 630 kHz	56

FIGURA 41	– Pulsos de Excitação do Arranjo Phased Array 1,25 MHz	56
FIGURA 42	– Espectro de Frequências do Arranjo Phased Array 1,25 MHz	57
FIGURA 43	– Pulso Barker Configurado no <i>software</i> TI Ultrasound Tools	58
FIGURA 44	– <i>A-Scan</i> do Ensaio com Pulso Barker	58
FIGURA 45	– Detalhamento do Pulso Barker e a Forma de Onda do Transdutor	59
FIGURA 46	– Pulso Barker Transmitido	59
FIGURA 47	– <i>A-Scan</i> Afetado por Ruído	60
FIGURA 48	– Resposta ao Impulso do Filtro Casado	61
FIGURA 49	– Saída do Filtro Casado	61

## LISTA DE SIGLAS

NDT	<i>nondestructive testing</i>
IC	<i>integrated circuits</i>
MATLAB	<i>matrix laboratory</i>
TR	<i>transmitter-receiver</i>
SNR	<i>signal to noise ratio</i>
PRF	<i>pulse repetition frequency</i>
VCA	<i>voltage-controlled amplifier</i>
USB	<i>universal serial bus</i>
SPI	<i>serial peripheral interface bus</i>
BP	<i>band pass</i>
PGA	<i>programmable-gain amplifier</i>
CSV	<i>comma separated values</i>
BNC	<i>bayonet neill concealman</i>
FPGA	<i>field programmable gate array</i>
ADC	<i>analog-to-digital converter</i>
LVDS	<i>low voltage differential signaling</i>
TGC	<i>time gain compensation</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$c_l$	velocidade da onda longitudinal
$c_t$	velocidade da onda transversal
$E$	módulo de elasticidade
$\rho$	massa específica
$\mu$	razão de Poisson
$G$	módulo de cisalhamento
$sgn$	operação sinal
$f_0$	primeira componente espectral
$x(t)$	sinal limpo sem ruído
$y(t)$	sinal perturbado por ruído
$n(t)$	ruído
$z^2(t_0)$	potência do sinal $z(t)$ no tempo $t = t_0$ no qual $z(t)$ é máximo
$z(t)$	saída do filtro casado
$F_m(f)$	função de transferência do filtro casado
$X^*(f)$	espectro complexo do sinal $x(t)$
$N$	máximo da função de autocorrelação
$\Delta t$	comprimento de bit
$X_i$	sequência binária do pulso ultrassônico codificado
$C(k)$	função de autocorrelação

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>13</b>
1.1	MOTIVAÇÃO	13
1.2	OBJETIVOS	14
1.2.1	Objetivos Gerais	14
1.2.2	Objetivos Específicos	14
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	14
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>15</b>
2.1	FÍSICA ACÚSTICA	15
2.2	MATERIAIS PIEZOELÉTRICOS	17
2.2.1	Transdutores	18
2.3	MÉTODOS	19
2.3.1	Método Pulso-Eco	19
2.3.2	Ultrassom <i>Phased Array</i>	21
2.4	PULSOS CODIFICADOS	22
2.4.1	Pulso Pseudo-Chirp Não Linear Modulado em Frequência	23
2.4.2	Pulso Barker	27
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E DESENVOLVIMENTO</b>	<b>29</b>
3.1	MATLAB	29
3.2	TI ULTRASOUND TOOLS	30
3.3	AFE5805EVM USB SPI	31
3.4	HIGH SPEED DATA CONVERTER PRO	31
3.5	TRANSDUTORES	32
3.6	ESTRUTURAS DE TESTES	34
3.7	A PLATAFORMA	35
3.8	SEQUÊNCIA DE ENERGIZAÇÃO E PROJETO DO CHASSIS	39
3.9	OS ENSAIOS	41
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>46</b>
4.1	ENSAIO DA CUBA DE ACRÍLICO	46
4.2	ENSAIO DO CORPO DE PROVA DE AÇO	52
4.3	ENSAIO DO CORPO CILÍNDRICO DE AÇO	53
4.4	DEMONSTRAÇÃO PHASED ARRAY	54
4.5	MANIPULAÇÃO E PROCESSAMENTO DOS DADOS BRUTOS	57
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>62</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>64</b>
	<b>Apêndice A – PROGRAMA DE ACIONAMENTO DAS FONTES</b>	<b>66</b>
	<b>Apêndice B – SCRIPT MATLAB</b>	<b>69</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A indústria de petróleo e gás emprega grandes estruturas em suas plantas. Uma infinidade de dutos e materiais de diferentes geometrias são encontrados em tais plantas. Como consequência, ao passar do tempo ocorrem desgastes como fadiga metálica dos materiais que compõem a estrutura. Ademais, em partes recém instaladas e soldadas podem haver imperfeições e descontinuidades que têm o potencial de acarretar graves falhas estruturais.

O método de inspeção não destrutiva (NDT) é uma técnica íntinseca aos ensaios e inspeções feitas via ultrassom. Ela permite a análise de uma dada superfície sem causar modificações à sua estrutura. Além disso, a operação de uma planta não precisa ser interrompida no evento de uma inspeção NDT. Este é um aspecto importante levando em consideração a complexidade de uma planta de petróleo e gás e prejuízos decorrentes da interrupção de operação da planta.

Este trabalho apresenta o desenvolvimento e operação de uma plataforma de ultrassom aberta de 8 canais. A importância do referido sistema é baseada no fato de que ele permite a análise dos dados *raw* das aquisições de ultrassom. Este é um ponto chave para a pesquisa e desenvolvimento de ensaios não-destrutivos (NDT) através de ultrassom, na medida que parâmetros como frequência, amplitude e atrasos podem ser extraídos via *post-processing*.

### 1.1 MOTIVAÇÃO

A alta complexidade de um sistema multicanal como o descrito desencoraja novas abordagens de desenvolvimento de plataformas de ultrassom. As partes que constituem o sistema são frequentemente caras e problemas de alimentação dos circuitos são usuais, levando a danos fatais como queima de circuitos integrados (IC).

Com este trabalho é pretendido dar um grande passo descomplicando o manuseio de uma plataforma de ensaios não destrutiva, por meio do desenvolvimento de um completo sistema de ultrassom aberto. Assim, o enfoque foi dado na implementação da alimentação do

sistema que gera frequentes problemas. Esta abordagem foi feita com o objetivo de focar o trabalho de um usuário da plataforma na realização dos ensaios não-destrutivos, tratando de antemão questões problemáticas de *hardware*.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 OBJETIVOS GERAIS

O objetivo deste trabalho é desenvolver uma plataforma de ultrassom aberta para execução de ensaios não destrutivos. Ela deverá ser capaz de realizar testes de inspeção ultrassônica utilizando primordialmente a técnica Pulso-Eco, assim como demonstrar o uso simultâneo dos oito canais. A aquisição dos sinais de ultrassom pode ser salva em arquivos binários para posterior *post-processing* via *software*.

### 1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- O sistema deve compreender tanto a parte de transmissão quanto a parte de recepção de ultrassom.
- A alimentação do sistema deve ser microcontrolada e automatizada tanto ao ligá-lo quanto ao desligá-lo.
- Realizar ensaios Pulso-Eco, demonstrar a aquisição simultânea de múltiplos canais e atrasos entre eles. Isto deve ser feito através de transdutores de duplo elemento, assim como em uma simulação da técnica *Phased Array*.
- Salvar os dados de aquisição em arquivos binários a fim de realizar *post-processing* através do *software* MATLAB.
- Demonstrar a aplicação prática do sistema através dos referidos ensaios.

## 1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho está dividido em cinco capítulos. No Capítulo 2 é feita a revisão bibliográfica, discorrendo sobre aspectos teóricos relacionados à inspeção via ultrassom como acústica física, ensaios não-destrutivos e métodos de inspeção. No Capítulo 3 são apresentados os materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento do trabalho. O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos pela aplicação da plataforma em inspeções e ensaios. Por fim, o Capítulo 5 apresenta as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Com este capítulo são explanados os conceitos teóricos constantes neste projeto. Os seguintes temas são abordados: acústica física, ensaios não-destrutivos, materiais piezoelétricos, método pulso-eco de inspeção, ensaios via técnica *Phased Array* e pulsos codificados.

### 2.1 FÍSICA ACÚSTICA

O fenômeno das vibrações mecânicas e sua propagação em materiais sólidos, líquidos e gasosos é descrito como a ciência do som. Ademais, a faixa de frequência audível por seres humanos é considerada estar situada entre aproximadamente 10 Hz a 15-20 kHz (KRAUTKRAMER, 1990).

De acordo com Krautkramer, quando são comparadas ondas de luz com ondas sonoras observa-se que as ondas ultrasônicas têm uma ocorrência bastante comum na natureza e na vida cotidiana. O ultrassom é um tipo de onda sonora que está acima da frequência limite superior da faixa audível do homem (EVANS; MCDICKEN, 2000). Na medicina e em várias aplicações a faixa usual de frequências utilizadas situa-se entre 2 MHz e 10 MHz. Além disso, McDicken e Evans detalham esses dois limites baseando-se em algumas características físicas. Considerações acerca do comprimento de onda são levadas em conta ao determinar o limite inferior. Há uma piora da resolução espacial - tanto axial quanto transversal - a medida que o comprimento de onda aumenta. Em contraste, a penetração da onda ultrasônica é otimizada. No caso do limite superior, um nível aceitável de potência é a especificação chave a ser observada. Existe um considerável aumento nos níveis de atenuação em altas frequências. Isto leva a um menor alcance no meio considerado pelo fato de que a potência de transmissão é enormemente diminuída no sentido de sua trajetória. Por outro lado, há um maior nível de detalhes devido a uma resolução otimizada em função de um comprimento de onda menor.

Existem dois grandes grupos de aplicações para ondas sonoras e ultrassom. O primeiro refere-se ao som agindo fisicamente em um dado material. Em outras palavras, ele executa uma

ação na qual uma força mecânica é exercida pela exploração da energia do som. O segundo grupo é mais interessante. Ele aponta para a exploração da condição física do som como um meio de transmitir um sinal suficientemente claro. Este é o uso não-destrutivo do som, o qual é de grande importância na checagem da condição de materiais, detecção da presença de falhas, medição de espessuras e determinação de propriedades elásticas e metalúrgicas (KRAUTKRAMER, 1990).

Os dois tipos principais de ondas sonoras usados em ensaios não-destrutivos são as ondas longitudinais e transversais. A primeira é dita ser a onda sonora real, pelo fato de transmitir as oscilações sonoras do ar para os nossos ouvidos, assim como transpassando corpos líquidos ou sólidos. As oscilações ocorrem de forma longitudinal, que têm a mesma direção de propagação. Existem forças de compressão e dilatação nas ondas longitudinais que levam elas a serem chamadas também de ondas de pressão ou compressão. O último tipo de onda sonora pode ocorrer somente em corpos sólidos. Ela também é chamada de *shear wave* (onda de cisalhamento) e a oscilação de suas partículas ocorre em ângulos retos em relação à direção de propagação (KRAUTKRAMER, 1990). O uso desse tipo de onda em inspeções via ultrassom é mais específico, com ângulo de inspeção diferente de 90 graus. Ela geralmente é obtida usando parte da energia das ondas longitudinais. Neste trabalho o foco é dado empregando o uso das ondas longitudinais em inspeções de caráter não-destrutivo.

A velocidade das ondas longitudinais  $c_l$  e transversais  $c_t$  é dada por Krautkramer pelas seguintes equações:

$$c_l = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1 - \mu}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}} \quad (1)$$

$$c_t = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1 + \mu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2)$$

, onde  $E$  é o módulo de elasticidade [N/m<sup>2</sup>],  $\rho$  é a densidade [kg/m<sup>3</sup>],  $\mu$  é a razão de Poisson, e  $G$  é o módulo de cisalhamento [N/m<sup>2</sup>]. A relação entre as duas velocidades é definida pela equação:

$$c_t = c_l \sqrt{\frac{1 - 2\mu}{2(1 - \mu)}} \quad (3)$$

, na qual para todos os materiais sólidos:

$$0 < \mu < 0.5 \quad (4)$$

$$0 < \sqrt{\frac{1-2\mu}{2(1-\mu)}} < 0.707 \quad (5)$$

É descrito que as razões entre as velocidades das ondas longitudinais e transversais para o aço e alumínio são as seguintes:

$$\frac{c_t}{c_l} = 0.55 \text{ e } 0.49 \text{ respectivamente.} \quad (6)$$

Como consequência desses valores e das equações anteriores, pode-se notar que a velocidade da onda longitudinal é sempre maior que a velocidade da onda transversal. As tabelas da Figura 1 permitem obter uma ideia de grandeza das velocidades longitudinal e transversal em seus respectivos materiais:

Material	Velocidade m/s	Material	Velocidade m/s
Ar	330	Ar	-
Alumínio	6300	Alumínio	3100
Cobre	4700	Cobre	2300
Ouro	3200	Acrílico	1100
Aço	5900	Alumínio	3100
Aço inoxidável	5800	Ouro	1200
Nylon	2600	Aço	3200
Óleo(SAE30)	1700	Aço Inoxidável	3100
Água	1480	Aço Fundido	2400
Prata	3600	Nylon	1100
Titânio	6100	Óleo(SAE30)	-
Níquel	5600	Água	-
Tungstênio	5200	Prata	1600
Magnésio	5.800	Titânio	3100
Acrílico	2.700	Níquel	3000
Aço Inoxidável	5.800	Magnésio	3000
Aço Fundido	4.800		

**Figura 1: Velocidades de Propagação das Ondas Sonoras. Na tabela à esquerda estão listadas as velocidades das ondas longitudinais e à direita as velocidades das ondas transversais.**

**Fonte: (ANDREUCCI, 2014)**

## 2.2 MATERIAIS PIEZOELÉTRICOS

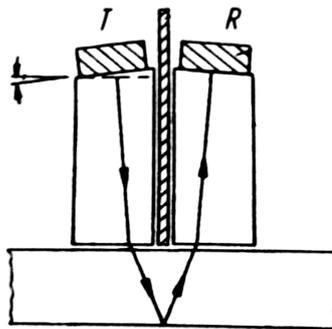
O fenômeno piezoelétrico é descrito como a propriedade que um material tem de produzir cargas elétricas em sua superfície em consequência de sua deformação por uma pressão mecânica externa. Esse foi um efeito descoberto pelos irmãos Curie em 1880. Do modo como descrito, o fenômeno piezoelétrico é tido como direto e é usado para medições através da

recepção de ondas ultrassônicas por um receptor. O fenômeno inverso foi descoberto logo após de acordo com o qual um potencial elétrico aplicado a um material muda sua forma, e em função das forças de compressão e dilatação ondas mecânicas são emitidas do mesmo. O efeito inverso é usado como um meio de transmitir ondas ultrassônicas através de um transmissor (KRAUTKRAMER, 1990). Krautkramer cita o cristal Titanato de Bário para a aplicação do efeito piezolétrico como um material regularmente usado no campo de ultrassom que tem uma estrutura um tanto quanto simples.

### 2.2.1 TRANSDUTORES

O efeito piezolétrico tem um importante papel em ensaios não-destrutivos. Ele permitiu a criação de transdutores ou sondas, as quais por sua vez se utilizam do efeito piezoelétrico de certos cristais para executar testes não-destrutivos em materiais.

Se o mesmo cristal é usado como transmissor e receptor após a transmissão do pulso de ultrassom, o transdutor é dito ser de único elemento. Se dois cristais separados por uma barreira acústica são usados independentemente para os propósitos de transmissão e recepção, tem-se um transdutor de duplo elemento ou uma sonda de transmissão-recepção (TR) (KRAUTKRAMER, 1990).



**Figura 2: Transdutor de Duplo Elemento e o Caminho do Som.**

**Fonte: (KRAUTKRAMER, 1990)**

Um transdutor de único elemento realiza inspeções em uma direção perpendicular à superfície do corpo em análise. A Figura 2 mostra que com um transdutor de duplo elemento há um pequeno desvio do plano normal em razão da trajetória em forma de V do pulso. Essa característica se deve ao fato de que o pulso de transmissão deve retornar como um eco ao cristal de recepção. A vantagem desse projeto de transdutor reside na condição da eliminação de uma

“zona morta” seguida do pulso transmitido (KRAUTKRAMER, 1990). Com um transdutor de elemento simples, a recepção do sinal de ultrassom não pode ser feita até que a emissão do pulso de transmissão tenha sido finalizada. Essa desvantagem é eliminada com a separação dos cristais de transmissão e recepção como descrito acima. Assim, tão logo o pulso de transmissão se inicia a recepção de quaisquer reflexões podem ser feitas pelo outro cristal. Esse fato aumenta a resolução de recepção e torna possível ensaios em materiais de pequena espessura.

Os transdutores são usualmente acoplados por uma camada líquida de acoplamento. Esta camada tem o objetivo de eliminar diferenças de impedância devido à presença de ar entre o transdutor e a superfície na qual é feito o ensaio.

## 2.3 MÉTODOS

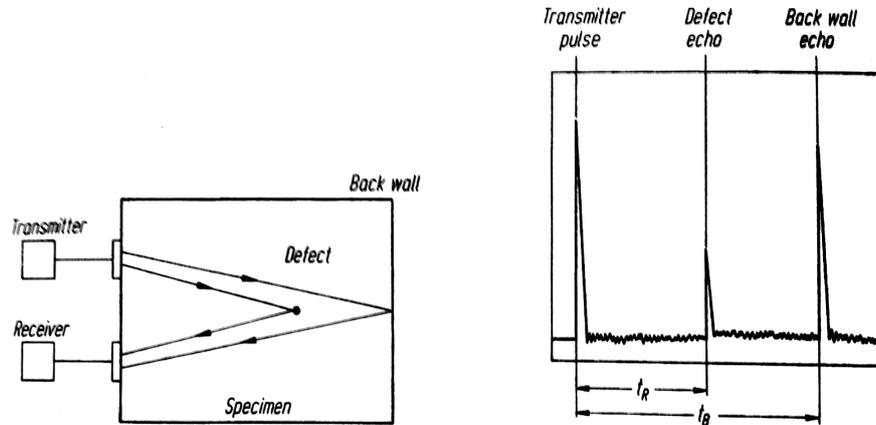
Sistemas de inspeção via ultrassom são bastante conhecidos por utilizar métodos que tiram vantagem de propriedades das ondas mecânicas como reflexão e interferência. Na subseção a seguir será discorrido o método Pulso-Eco, o qual é baseado na reflexão das ondas. Em sequência será apresentada a técnica de ultrassom *Phased Array* que é baseada na última propriedade citada.

### 2.3.1 MÉTODO PULSO-ECO

O método Pulso-Eco é o meio clássico de realizar inspeções não-destrutivas através de ultrassom. Ele é baseado em uma diferença de impedância entre materiais adjacentes. Por exemplo, quando uma onda ultrassônica encontra uma barreira devido a uma inomogeneidade no material ou a transferência para um outro tipo de meio, uma diferença de impedância é observada. Percebe-se de acordo com o exposto por Krautkramer, que parte do ultrassom é refletida ao atingir obstáculos e inomogeneidades, e o restante continua a se propagar no corpo de teste em questão até atingir a extremidade oposta do mesmo. Esse é o limite da estrutura em inspeção chamada de *back wall*. Nela, o ultrassom atinge a interface entre o material e o meio externo que pode ser o ar, água ou a superfície na qual ele encontra-se disposto. Os ecos são gerados à medida que o ultrassom se propaga ao longo do tempo de acordo com as respectivas mudanças de interface. As reflexões são recebidas pelo receptor e devido ao efeito piezoelétrico um sinal elétrico é gerado.

Em um *display* os resultados podem ser vistos como uma representação linear chamada de *A-Scan*. Como delineado por Krautkramer, o eixo horizontal é proporcional ao tempo. Já o eixo vertical corresponde à amplitude da onda de ultrassom, que geralmente é pequena e

encontra-se na faixa dos microvolts. A Figura 3 demonstra uma inspeção com um transdutor de elemento duplo em um corpo de teste e seu *A-Scan* correspondente.



**Figura 3: Método Pulso-Eco e sua Representação *A-Scan* em um Display.**

**Fonte: (KRAUTKRAMER, 1990)**

Dados os tempos de trânsito do pulso de ultrassom - representados por  $t_R$  e  $t_B$  na Figura 3 - é possível calcular a distância percorrida pelo mesmo até os refletores e o *back wall*. Tendo conhecimento da velocidade do som no material, tipo de onda ultrassônica e o fato de que o pulso propaga-se para e de um dado refletor, Krautkramer obtém a distância  $d$  de um refletor pela seguinte equação:

$$\frac{2d}{t} = c \quad \text{ou} \quad d = \frac{ct}{2} \quad (7)$$

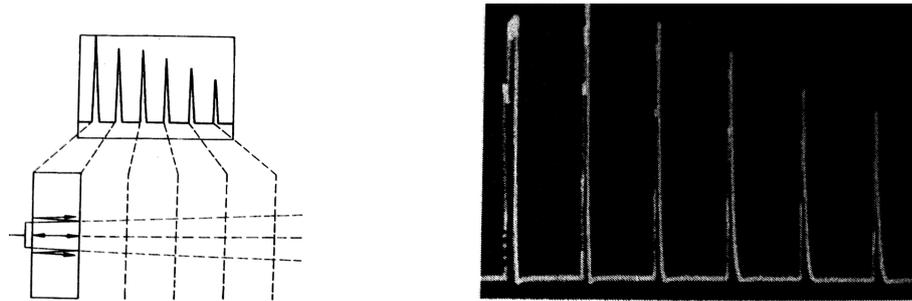
É importante enfatizar alguns pontos expostos por Krautkramer a respeito do método Pulso-Eco. Devido as especificações do receptor e transmissor e propriedades físicas, erros e resultados indesejados podem surgir como resultado das inspeções.

Um sistema que transmite a onda ultrassônica com uma baixa potência de saída recebe ecos com uma amplitude reduzida. Isto aumenta a propensão do sinal a ruídos e consequentemente diminui a relação sinal-ruído (SNR) do sistema. Desse modo, pequenas falhas podem passar despercebidas em uma inspeção pela má qualidade do sinal refletido. Assim, costuma-se excitar o transdutor com tensões que podem chegar na faixa de centenas de volts para garantir uma amplitude satisfatória do sinal. Outro problema é a presença de grandes refletores na frente de outros substancialmente menores, os quais na referência do transdutor acabam por ser encobertos. Ademais, amostras e corpos não homogêneos provocam o espalhamento do pulso de ultrassom ao ponto de o mesmo perder toda a sua energia, não

alcançando possíveis refletores.

Com esses fatores em mente, é importante considerar aspectos como a posição espacial do transdutor no corpo de teste, propriedades físicas do material a ser inspecionado e as especificações de transmissão do pulso ultrassônico.

Krautkramer também descreve o resultado obtido de um ensaio não-destrutivo através do método Pulso-Eco de uma amostra plano-paralela homogênea. Vários ecos igualmente espaçados são observados em um *display* do referido ensaio. Essa situação deriva do fato de que somente uma pequena parte da energia é perdida quando o pulso atinge o *back wall* ou um dado refletor, e portanto a reflexão ocorre múltiplas vezes do refletor à superfície de teste e vice-versa, até que a energia seja reduzida a zero. A Figura 4 mostra que em uma visualização da varredura de um *A-Scan* correspondente, a diminuição gradual da amplitude do pulso está diretamente relacionada à essa condição.



**Figura 4: Ecos Múltiplos em uma Amostra Plano-Paralela e seu *A-Scan* correspondente.**

**Fonte: (KRAUTKRAMER, 1990)**

### 2.3.2 ULTRASSOM *PHASED ARRAY*

Existem estruturas que requerem focalização em uma determinada região, e portanto direcionamento do feixe ultrassônico. Como descrito por Hedrick e Hykes: “a captura de dados ao longo de várias linhas de visão é possibilitada através da focalização do feixe por todo o campo de visão.”

Para entender esse conceito, pode-se imaginar um transdutor composto de vários cristais. Esses cristais estão separados um do outro a uma mesma distância do comprimento de onda. Eles são usados para produzir frentes de onda circulares. Entretanto, desta vez tem-se uma sequência de cristais excitados em sequência com um pequeno atraso de tempo fixo entre os estímulos. Este fato resulta em uma interferência das frentes de onda circulares, produzindo uma frente de onda planar direcionada em um ângulo particular através da estrutura. O feixe

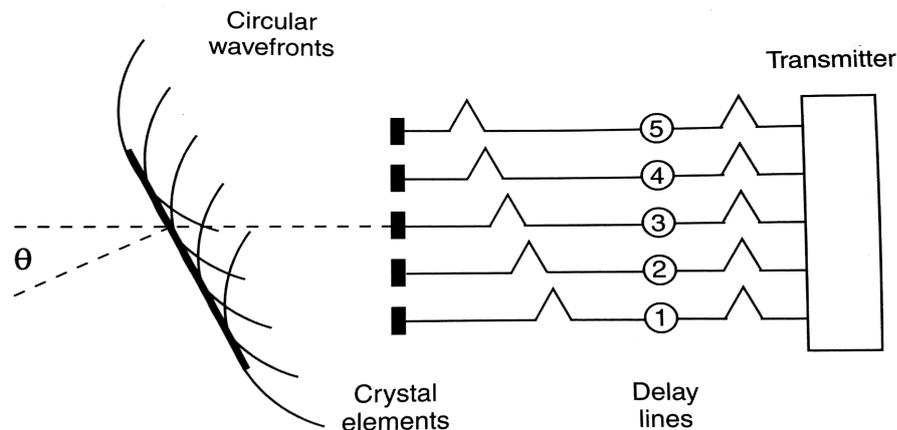
pode ser direcionado a um ângulo desejado pela mudança do atraso de tempo. Essa configuração é descrita como *Phased Array Testing* (STARCHMAN et al., 2005).

O atraso de tempo de uma configuração *Phased Array* linear com separação de elemento igual à metade do comprimento de onda é dada pela equação abaixo. Para ângulos maiores de direcionamento o atraso de tempo é aumentado (STARCHMAN et al., 2005).

$$\text{Atraso de tempo} = \frac{\sin \theta}{2 f} \quad (8)$$

De acordo com Krautkramer, o número de cristais usados em um arranjo *Phased Array* para aplicações médicas está na faixa de várias centenas, enquanto que para testes em materiais - por exemplo em soldas - gira em torno de 24 a 50 cristais.

Mostra-se a seguir a visualização da referida configuração. A Figura 5 mostra cinco linhas de atraso excitando seus cristais correspondentes, o que culmina na geração de uma frente de onda planar.



**Figura 5: Direcionamento de Feixe e Focalização.**

**Fonte: (STARCHMAN et al., 2005)**

## 2.4 PULSOS CODIFICADOS

Os sistemas de inspeção por ultrassom comumente têm que fazer um balanço entre resolução espacial e profundidade de penetração. Um pulso de ultrassom estreito torna possível uma maior resolução ao permitir visualizar sinais de eco minimamente espaçados. Em contrapartida, a relação sinal-ruído é baixa. Já uma maior profundidade de penetração geralmente está associada a um maior pico de energia do pulso que por ser mais longo permite

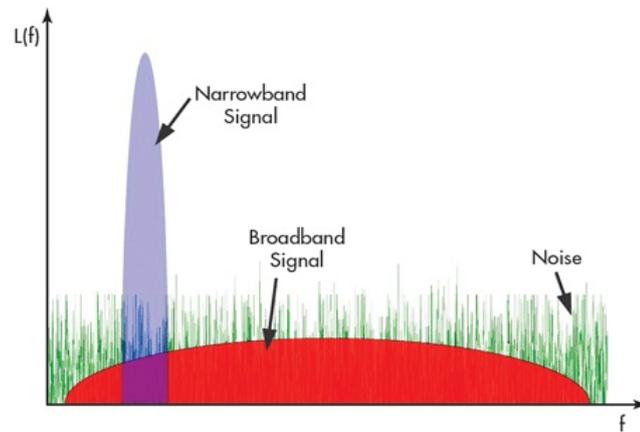
uma varredura espacial de áreas maiores, mas com uma resolução menor embora a SNR seja maior. Aliado a esses fatos, a escolha de um transdutor com uma frequência central adequada à resolução e profundidade desejadas é um ponto importante a ser considerado.

Em ambos os casos o ruído é um grande empecilho que pode mascarar totalmente um sinal de eco de ultrassom. No entanto, os sistemas com maior resolução e menor profundidade de penetração são mais afetados. É possível aumentar consideravelmente a relação sinal-ruído desses sistemas assim como a profundidade de penetração, utilizando técnicas de pulso codificados. Com a aplicação de tais pulsos, toda a informação da forma de onda de transmissão está contida na fase e a amplitude constante não contém informação (POLLAKOWSKI; ERMERT, 1994). Assim, é possível fazer a autocorrelação do sinal de eco recebido com uma forma de onda de referência por meio de um filtro casado (CHEN; DENG, 1987). Desse modo, o ruído presente é eliminado e o pulso de saída que poderia estar mascarado é agora possível de ser visualizado.

#### 2.4.1 PULSO PSEUDO-CHIRP NÃO LINEAR MODULADO EM FREQUÊNCIA

Compressão de Pulso Chirp é uma técnica de correlação de sinal usando pulsos modulados em frequência. Seu uso foi difundido com a aplicação em sistemas de radares com o intuito de aperfeiçoar a resolução e profundidade (POLLAKOWSKI; ERMERT, 1994).

A aplicação no ultrassom apresenta diferenças. Enquanto existe uma função de transferência característica para sistemas de radares, o ultrassom apresenta um comportamento passa-banda. Com isso, a magnitude de seu espectro tem um formato que se assemelha a um sino, como mostrado na Figura 6. Isso se deve ao fato do transdutor se comportar como um filtro por si só, e deixar passar um estreita banda (*narrowband*) em relação à sua frequência característica. Excitado por um sinal com uma larga largura de banda (*broadband*) como um pulso muito curto, há perdas devido à incompatibilidade espectral (POLLAKOWSKI; ERMERT, 1994).

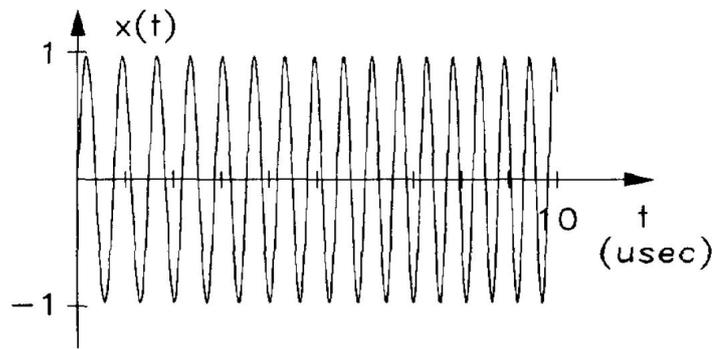


**Figura 6: Espectro de um Sistema de Ultrassom representado por um Sinal *Narrowband*.**

**Fonte: (DELISLE, 2014)**

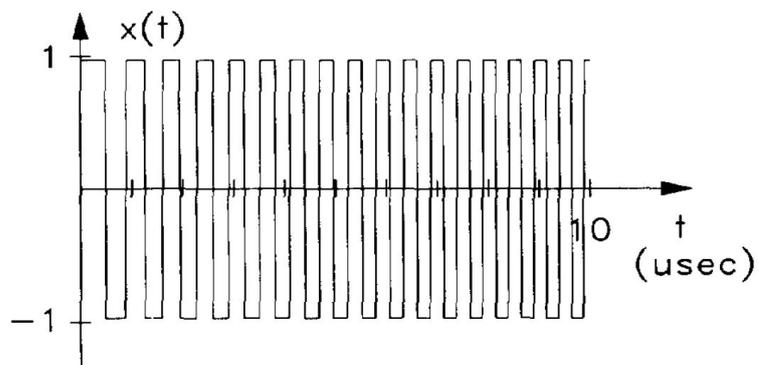
Somado a isso, em ensaios não-destrutivos, geralmente o corpo a ser analisado encontra-se em repouso em relação ao sistema. Assim, deslocamentos de frequência devido ao efeito Doppler não precisam ser considerados. A Figura 7 mostra pulsos com variação de frequência que podem ser utilizados nos ensaios. Tais pulsos não-lineares modulados em frequência aprimoram a razão do lóbulo principal para o lóbulo lateral no espectro (POLLAKOWSKI; ERMERT, 1994).

Além disso, o uso de formas de onda quadradas ao invés de senoidais exibem vantagens. O pulso Chirp é usualmente senoidal, mas a sua variação como um pulso quadrado chamada de Pseudo-Chirp é usada para fins práticos. O comportamento passa-banda do transdutor permite a aplicação de um sinal quadrado modulado em frequência com mais harmônicas em relação a um pulso linear. O uso de um pulso quadrado diminui a complexidade do *hardware* assim como aumenta a energia do sinal transmitido. Isto se deve à fundamental de uma forma de onda quadrada ter uma amplitude maior que a correspondente fundamental da forma de onda senoidal (POLLAKOWSKI; ERMERT, 1994). A Figura 8 mostra um pulso Pseudo-Chirp Não Linear Modulado em Frequência.



**Figura 7: Sinal Chirp Senoidal Linear Modulado em Frequência.**

**Fonte: (POLLAKOWSKI; ERMERT, 1994)**



**Figura 8: Pseudo-Chirp Não Linear Modulado em Frequência.**

**Fonte: (POLLAKOWSKI; ERMERT, 1994)**

Uma onda chirp quadrada pode ser gerada a partir de uma onda chirp senoidal pela operação  $sgn$  (sinal):

$$x_r(t) = sgn(x_s(t)) \text{ com } sgn(x) = \begin{cases} 1 & x > 0 \\ 0 & x = 0 \\ -1 & x < 0 \end{cases} \quad (9)$$

Pollakowski e Ermert observam que existem três níveis possíveis e o valor médio contínuo não é transmitido pelo transdutor, em razão de seu comportamento banda-passa. Assim, pode-se adequar a operação para resultar em apenas dois níveis do seguinte modo:

$$x_r(t) = \frac{1}{2}(1 + sgn(x_s(t))) \quad (10)$$

Toma-se como base um sinal senoidal  $x_s(t) = \text{sen}(\omega_0 t)$  com uma componente espectral  $f_0$  e a onda quadrada  $x_r(t)$  derivada do mesmo e representada pela série de Fourier:

$$x_r(t) = a_1 \text{sen}(\omega_0 t) + a_2 \text{sen}(3\omega_0 t) + \dots$$

$$\text{com : } a_n = \frac{4}{n \pi} \quad (11)$$

Observa-se a presença de harmônicos ímpares e a amplitude da primeira componente espectral  $f_0$  sendo de  $\frac{4}{\pi} = 1,273$ . Os outros harmônicos não são transmitidos pelo transdutor e a amplitude do sinal quadrado é 1,273 vezes maior em comparação ao sinal senoidal, resultando em um aumento na amplitude dos ecos (POLLAKOWSKI; ERMERT, 1994).

Usa-se filtragem casada para detectar um sinal conhecido  $x(t)$  em um sinal  $y(t)$  perturbado por um ruído  $n(t)$ :

$$y(t) = x(t) + n(t) \quad (12)$$

A relação sinal-ruído se dá pela seguinte razão:

$$SNR = \frac{z^2(t_0)}{E(N^2(t))} \quad (13)$$

, onde  $z^2(t_0)$  é a potência do sinal  $z(t)$  no tempo  $t = t_0$  no qual  $z(t)$  é máximo,  $E(N^2(t))$  é a potência média do ruído da saída do filtro  $z(t) = f_m(t) * y(t)$  na qual  $f_m(t)$  é a resposta ao impulso maximizada do filtro casado.

A função de transferência do filtro  $F_m(f)$  é dada pelo conjugado do espectro complexo do sinal  $X^*(f)$ , e a resposta ao impulso do filtro é dado pelo pulso de eco após inversão no tempo (POLLAKOWSKI; ERMERT, 1994).

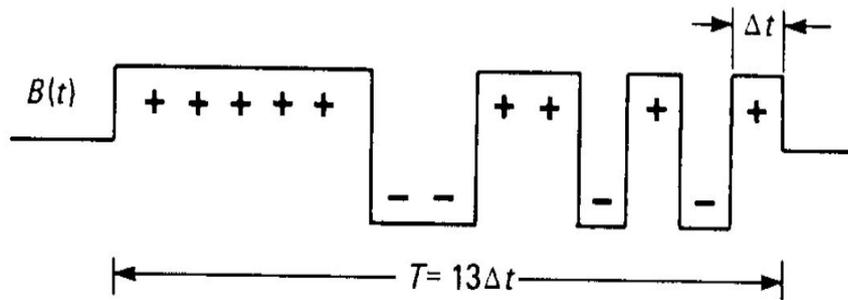
$$F_m(f) = X^*(f), f_m(t) = x(-t) \quad (14)$$

Assim, mesmo sinais com pulsos curtos e pouca energia podem ter sua SNR melhorada pelo casamento com o sinal transmitido. Por meio da modulação em frequência não linear faz-se o casamento do sinal Pseudo-Chirp à função de transferência. A consequente redução de complexidade torna o uso de sinais quadrados modulados em frequência úteis para configurações *Phased Array* (POLLAKOWSKI; ERMERT, 1994).

### 2.4.2 PULSO BARKER

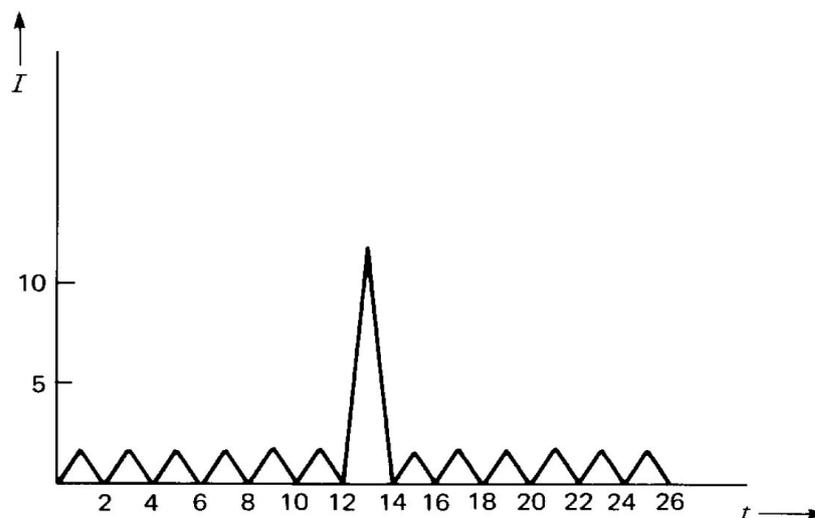
Existem classes especiais de códigos binários. O código Barker é otimizado considerando sua função de autocorrelação. Ela é definida de modo que seu pico é  $N$  e a magnitude dos lóbulos laterais é 1, na qual  $N$  é o comprimento do código em bits. Existe uma quantidade escassa de códigos desse tipo. A Figura 9 mostra o maior código Barker existente com 13 bits (CHEN; DENG, 1987).

Assim como o Pulso Pseudo-Chirp, o seu formato é digital e somente dois níveis são necessários. A Figura 10 mostra a sua função de autocorrelação que tem o máximo em  $N$  e comprimento igual a  $2\Delta t$ , onde  $\Delta t$  é o comprimento de bit. O comprimento total é de  $2N\Delta t$ .



**Figura 9: Pulso Barker de 13 bits.**

Fonte: (CHEN; DENG, 1987)



**Figura 10: Função de Autocorrelação do Pulso Barker de 13 bits.**

Fonte: (CHEN; DENG, 1987)

A janela de tempo entre dois pulsos ou a frequência de repetição do pulso (PRF) determina a faixa sem ambiguidade entre dois pulsos (CHEN; DENG, 1987). Em outras palavras, é o tempo mínimo necessário para o envio de outro pulso sem causar sobreposição na transmissão e recebimento do eco do pulso anterior. Essa faixa é dada por  $(1/2)c_t T$ , onde T é o comprimento total do pulso. Já a resolução espacial é dada por  $(1/2)c_t \Delta T$  e é por consequência determinada pelo comprimento de bit. Esses parâmetros devem ser ajustados para cobrir a faixa de interesse (CHEN; DENG, 1987).

Os métodos comumente usados para projetar o filtro casado, em um sistema de compressão de pulsos como os aqui vistos são os seguintes: complexo conjugado, inversão no tempo e correlação. No pulso Barker é empregado o uso do método de autocorrelação que faz uso de registradores de deslocamento para a implementação do filtro digital (CHEN; DENG, 1987).

Tendo uma sequência binária  $X_i$ , a função de autocorrelação  $C(k)$  de  $X_i$  é dada por

$$C(k) = \sum_{i=1}^{N-k} X_i X_{i+k} \quad (15)$$

$$k = 0, +1, \dots, +N - 1$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, N$$

Assim como a compressão de Pulso Chirp, o pulso Barker possibilita a obtenção de significativa melhora na relação sinal-ruído. O filtro casado usado em conjunto na recepção não só exclui o ruído mas também é um fator de aprimoramento da SNR (CHEN; DENG, 1987).

### 3 MATERIAIS E DESENVOLVIMENTO

Um conjunto de *softwares* e kits de desenvolvimento foi utilizado para a concretização do projeto. A integração *hardware-software* possibilitou a implementação de um sistema que compreende as etapas de geração, transmissão e aquisição de ultrassom para análise via *post-processing*. Nas próximas seções serão apresentados os materiais e o desenvolvimento da plataforma.

#### 3.1 MATLAB

MATLAB é uma linguagem para computação técnica a qual é expressa usando notação matemática familiar. O elemento básico é uma matriz sem dimensão pré-definida a partir da qual vários problemas de âmbito matemático podem ser resolvidos. É vastamente empregada em universidades e na indústria, tanto em cursos como em pesquisa, desenvolvimento e análise. MATLAB é um acrônimo que significa *Matrix Laboratory*. Originalmente foi escrito com a finalidade de prover fácil acesso aos *softwares* desenvolvidos pelos projetos LINSPACK e EISPACK consagrados na área de computação matricial (COOPERATIVE INSTITUTE FOR METEOROLOGICAL SATELLITE STUDIES, 2018).

Atualmente o MATLAB é um grande sistema computacional composto de várias partes. As principais são listadas a seguir:

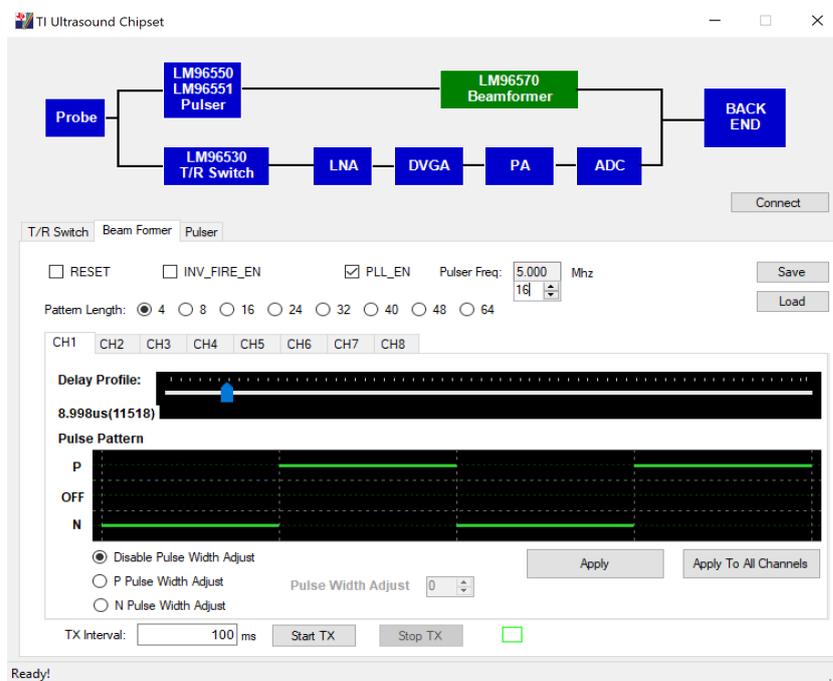
1. A linguagem MATLAB, a qual caracteriza-se por ser de alto nível baseada em vetores e matrizes. Apresenta recursos como estruturas de controle de fluxo, entrada/saída de dados e aspectos de programação orientada a objetos, assemelhando-a a várias linguagens de programação contemporâneas como Java e Python. Podem ser criadas funções (arquivos com extensão M) e *scripts* quando o objetivo é o desenvolvimento de programas mais completos e complexos, ou simplesmente usar o terminal para testes e rápidas verificações.
2. O ambiente gráfico de trabalho MATLAB, o qual permite manipular variáveis, escrever

programas, acessar as aplicações presentes no MATLAB e importar e exportar dados.

3. Manipulador gráfico, que contém ferramentas para plotagem de gráficos, visualização de dados, processamento de imagens e implementação de interfaces gráficas.
4. Bibliotecas de Funções Matemáticas. Elas contém funções aritméticas básicas assim como mais sofisticadas, abrangendo conceitos como transformadas de Fourier e algoritmos de manipulação matricial.
5. *Toolboxes* que são conjuntos de ferramentas específicas para aplicações em áreas como redes neurais e sistemas de controle. Conjuntos de funções em arquivos M compõem os *Toolboxes* que disponibilizam interfaces gráficas para manipulação dos dados.

### 3.2 TI ULTRASOUND TOOLS

O *software* TI Ultrasound Tools é o programa de controle de geração e transmissão do pulso de ultrassom. A configuração dos parâmetros dos canais é feita através dele de acordo com os transdutores em uso. A Figura 11 apresenta a tela do *software*. Nela pode ser observado que existem várias opções de configuração do pulso. Elas serão explicadas posteriormente concomitante à explicação da operação do sistema.

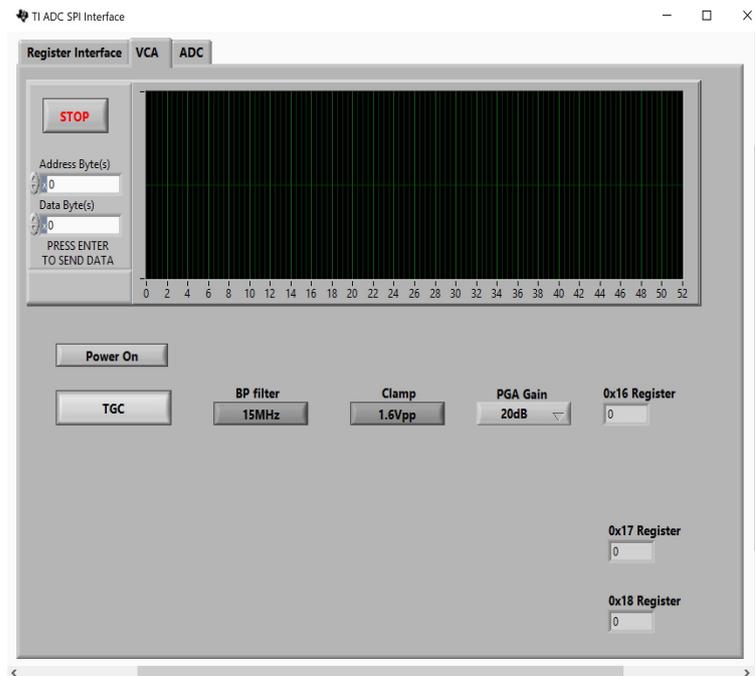


**Figura 11: Software TI Ultrasound Tools.**

**Fonte: (TEXAS INSTRUMENTS, 2014)**

### 3.3 AFE5805EVM USB SPI

O *software* AFE5805EVM USB SPI é usado para configurar os registradores que comandam a operação de um ADC de 12 bits, para recepção e conversão dos pulsos de eco de ultrassom. A taxa de amostragem é por padrão de 40MHz, que também pode ser definida a partir de um *clock* externo. Além disso, os parâmetros de um amplificador controlado por tensão (VCA) são ajustados para a entrada do sinal no conversor analógico-digital. O *software* em questão é usado para o controle do *Front-End* de Recepção de Ultrassom Texas Instruments AFE5805EVM. Os comandos são enviados através do protocolo USB e convertidos para o protocolo SPI. A Figura 12 apresenta a tela do *software*. Nela pode ser observado a presença de parâmetros ajustáveis, como a frequência do filtro banda-passa (*BP filter*) e o amplificador de ganho programável (*PGA Gain*)(QUADROS; OFUCHI, 2018).



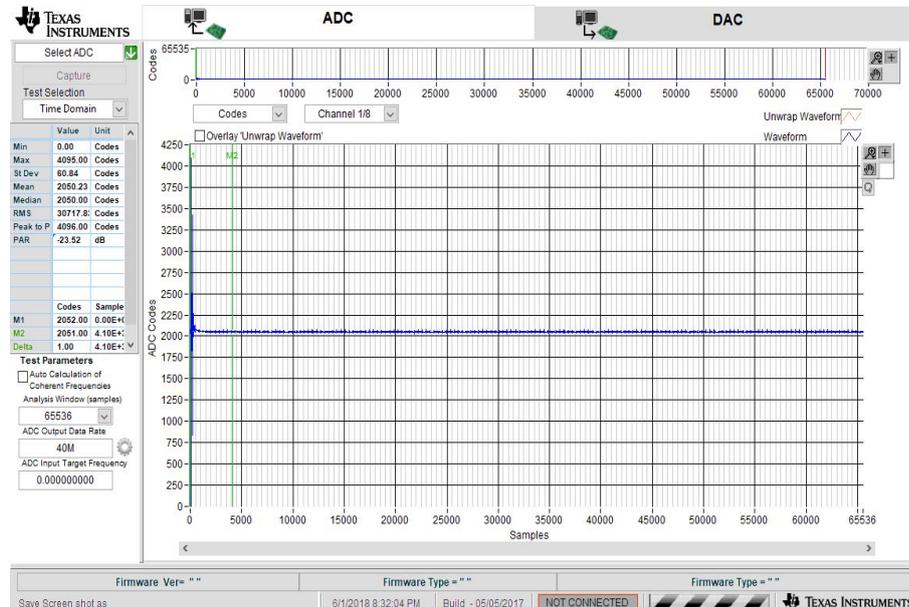
**Figura 12: Software AFE5805EVM USB SPI.**

**Fonte: (TEXAS INSTRUMENTS, 2018a)**

### 3.4 HIGH SPEED DATA CONVERTER PRO

O *software* High Speed Data Converter Pro é utilizado para captura e visualização de dados em conjunto com o referido *software* de controle do *Front-End* de Ultrassom. Ele permite visualizar uma prévia dos dados adquiridos no domínio do tempo, bem como seu espectro no domínio da frequência. Além disso, permite configurar o número de amostras compondo a

janela de aquisição. Entre suas funcionalidades, destacam-se a possibilidade de realizar disparos via *trigger* externo, captura contínua de dados e importar e exportar dados em arquivos binários e CSV. A Figura 13 apresenta a tela do *software* e suas configurações, como o tamanho da janela de aquisição e a taxa de amostragem do ADC (QUADROS; OFUCHI, 2018).



**Figura 13: Software High Speed Data Converter Pro.**

**Fonte: (TEXAS INSTRUMENTS, 2018c)**

### 3.5 TRANSDUTORES

Transdutores de duplo elemento Olympus DHC711-RM de 5MHz foram usados nos ensaios. Enquanto um elemento transmite ondas longitudinais, o outro elemento se comporta como um receptor. A resolução próxima à superfície é excelente quando comparada a transdutores de único elemento. Além disso, eles combinam as capacidades de penetração de transdutores de único elemento de baixa frequência, com as capacidades de resolução próximo à superfície de transdutores de único elemento de alta frequência (OLYMPUS, 2010).

O transdutor dispõe de dois conectores BNC correspondentes a cada elemento, para conexão ao barramento de transmissão/recepção. Dentre as aplicações, constam medição de espessura de paredes e detecção de rachaduras e porosidades.

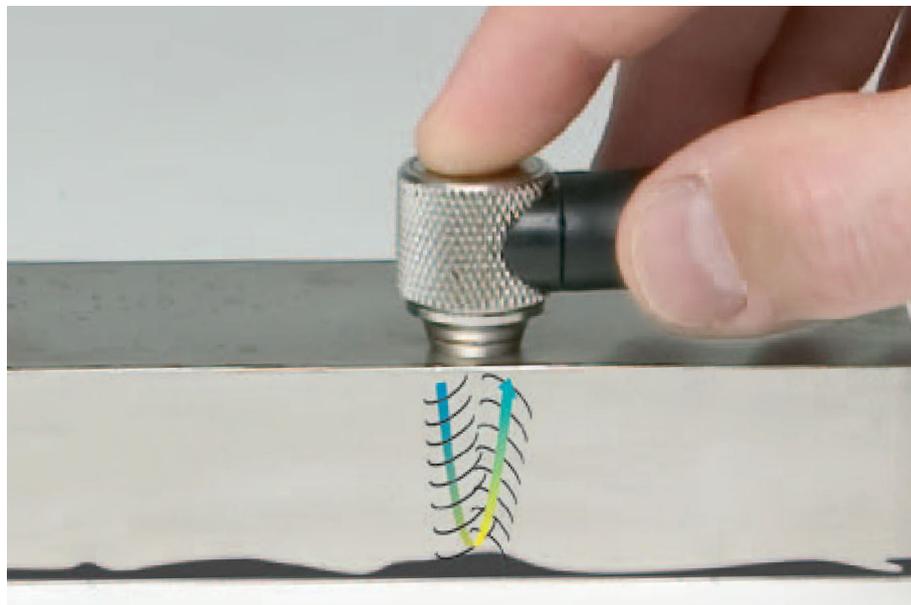
Os transdutores foram usados com acoplante em gel ou glicerina e em ambiente submerso. Neste último caso, uma versão modificada do transdutor DHC711-RM foi utilizada tornando-o a prova d'água de modo semelhante à versão DHC709-RM. A Figura 14 mostra os

transdutores em questão. Já a Figura 15 mostra a representação do trajeto da onda ultrassônica, desde o seu disparo até a sua recepção.



**Figura 14: Transdutores Olympus.**

Fonte: (OLYMPUS, 2010)



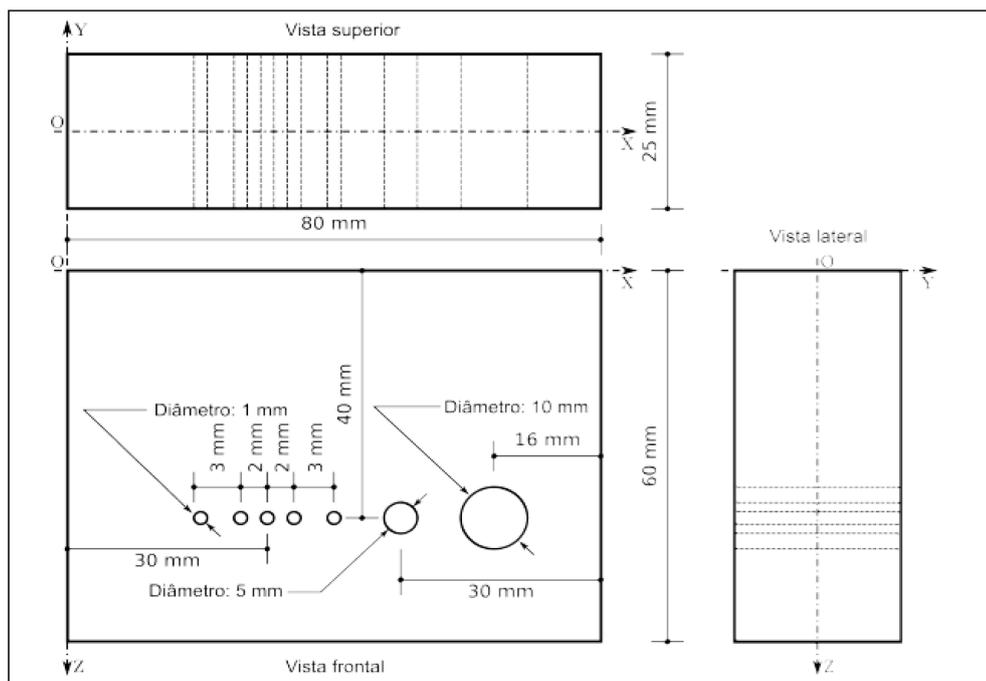
**Figura 15: O Trajeto da Onda Sonora em Formato V do Transdutor de Duplo Elemento.**

Fonte: (OLYMPUS, 2010)

### 3.6 ESTRUTURAS DE TESTES

Estruturas de testes foram utilizadas para a execução de ensaios não-destrutivos de modo a avaliar a performance da plataforma.

Uma cuba de acrílico foi usada para ensaios submersos. Desse modo, pôde-se avaliar resultados de testes de ultrassom com a onda sonora percorrendo a interface água-acrílico. Um corpo de teste de aço com descontinuidades pré-definidas também foi usado assim como um cilindro oco de aço. A Figura 16 mostra o diagrama deste corpo de teste com as descontinuidades e suas respectivas dimensões. A Figura 17 mostra que o cilindro contém espaços para suporte dos transdutores em sua parede, de modo que eles podem ser posicionados voltados um para o outro. Completando o cilindro com um fluido como a água, testes de transmissão e recepção puderam ser efetuados.



**Figura 16: Diagrama do Corpo de Teste de Aço com orifícios pré-definidos.**

**Fonte: (GUARNERI, 2014)**



**Figura 17: Cilindro de Aço com Suporte para os Transdutores.**

**Fonte: Autoria Própria**

### 3.7 A PLATAFORMA

Com os conceitos explanados, a Plataforma de Ultrassom de 8 Canais é apresentada, com o propósito de executar ensaios não-destrutivos e realizar pesquisas na área de ultrassom. A proposta é descomplicar o manuseio e manipulação de dados de um sistema de ensaios não-destrutivos, por meio do desenvolvimento de uma plataforma aberta de ultrassom. O sistema consiste das partes de transmissão e recepção de ultrassom, assim como de um projeto customizado de alimentação.

As características do sistema são discutidas a seguir. Ele fornece oito canais para inspeção via ultrassom com controle individual de cada um e *trigger* simultâneo. Desse modo, ensaios *Phased Array* e Pulso-Eco podem ser executados pela configuração de um conjunto de parâmetros no *software* TI Ultrasound Tools como se segue:

1. Frequência do Pulsador (*Pulser Frequency*). Esse parâmetro é ajustado de acordo com a frequência característica do cristal do transdutor.
2. Comprimento do Padrão de Pulso Quadrado (*Pattern Length*). Ele fornece várias opções

de comprimento do pulso de transmissão.

3. Perfil de Atraso de cada Canal (*Delay Profile*). Possibilita atrasar o início do pulso em relação ao disparo de transmissão.
4. Frequência de Repetição do Pulso (PRF ou *TX Interval*). Configura o intervalo de repetição do pulso.

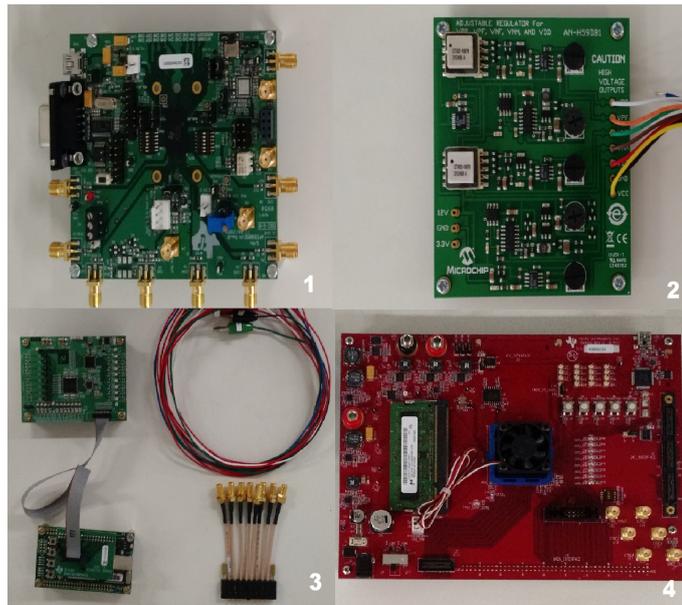
O pulso de ultrassom tem três níveis configuráveis para cada um de seus segmentos: positivo (P), desligado (OFF) e negativo (N). O pulso é composto de até 64 segmentos, sendo o comprimento de cada segmento igual à duração de um semiciclo determinado pela frequência do pulsador.

Uma Plataforma de Ultrassom é tipicamente composta das seguintes partes:

- Transmissão (linhas de alta tensão, pulsador, *beamformer de transmissão*).
- Recepção (AFE - *front end* analógico, módulo de aquisição de dados, *switch* de transmissão/recepção).
- Processamento Digital - FPGAs (Controle de Transmissão, Controle de Recepção), Armazenamento e Processamento de Dados.
- Computador para recepção de dados e execução de *post-processing*.

O lado de transmissão necessita de altas tensões para a excitação do cristal, e consequente geração do pulso de ultrassom. O *beamformer* gera o sinal que excita o pulsador, responsável por transmitir os pulsos com determinada PRF. No lado de recepção, o sinal é tratado de modo a possibilitar sua aquisição e posterior armazenamento de dados. O *switch* de transmissão/recepção é parte fundamental dessa etapa, pois diminui a amplitude do sinal recebido, o qual danificaria o *front end* analógico sem o tratamento adequado.

A partir dessa concepção a Plataforma de Ultrassom foi implementada, com a proposta do desenvolvimento de pesquisas em um ambiente com controle dos lados de transmissão e recepção. Kits de desenvolvimento foram usados para projetar e desenvolver o sistema.



**Figura 18: Kits de Desenvolvimento Empregados na Plataforma.**

**Fonte: Autoria Própria**

A Figura 18 mostra os kits de desenvolvimento, a saber:

1. Texas Instruments AFE5805 *8-Channel Analog Front End for Ultrasound*. É um *front-end* de ultrassom completo composto de 8 canais, filtros, conversor analógico-digital (ADC) de 12 bits, e saídas de dados *low voltage differential signaling* (LVDS).
2. Microchip AN-H59DB1. Trata-se de um conversor DC-DC de alta tensão. Ele provê as linhas de alta tensão necessárias para a parte de transmissão da plataforma.
3. Texas Instruments TX-SDK-V2. Compreende a configuração, geração e transmissão dos pulsos de ultrassom consistindo de 8 canais, uma FPGA para configuração do *beamformer*, o *beamformer* propriamente dito, um pulsador e um *switch* de transmissão/recepção. Portanto, pode ser acoplado a um *Front-End* analógico de recepção de ultrassom.
4. Texas Instruments TSW1400EVM. É uma placa de captura de dados com 8 linhas LVDS. Consiste de uma plataforma de captura de dados de 16 bits para ADCs de alta velocidade, 1GB de memória e uma FPGA Altera Stratix IV.

Esses kits de desenvolvimento foram integrados para implementar a plataforma.

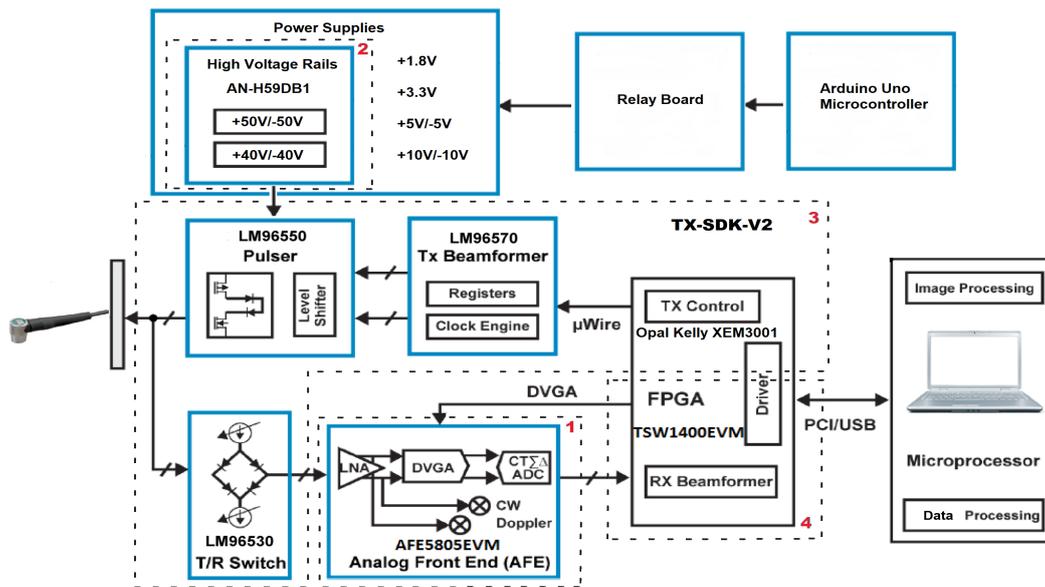


Figura 19: Diagrama em Blocos da Plataforma de Ultrassom.

Fonte: Adaptado do Datasheet do CI LM96530

A Figura 19 apresenta o diagrama em blocos da plataforma, na qual cada kit de desenvolvimento e seus componentes foram destacados de acordo com a lista enumerada anterior. Nela pode ser observado que a plataforma consiste tanto da parte de transmissão quanto da parte de recepção de sinal. O controle de transmissão do pulso de ultrassom é feito pelo software TI Ultrasound Tools. Ele estabelece os parâmetros e *flags* apropriadas na FPGA Opal Kelly XEM3001. A FPGA por sua vez configura e dispara o *Beamformer* de transmissão, responsável por produzir na saída pulsos digitais programáveis padronizados ao pulsador de alta tensão. Este por sua vez excita diretamente até oito transdutores. A recepção do sinal é feita no barramento do *switch* de transmissão/recepção. Este circuito diminui a amplitude do sinal de recepção de alta tensão presente no barramento de transmissão/recepção. O *Front End* analógico filtra, amplifica e aplica a conversão analógico-digital ao sinal. Ele usa o modo de compensação tempo-ganho (TGC) para mitigar atenuações do pulso no material submetido ao ensaio. Em seguida, o armazenamento do sinal adquirido é feito pela placa de captura de dados. Após “deserializar” os dados recebidos pelo barramento LVDS, a FPGA Altera Stratix IV armazena-os na memória de 1GB. A FPGA também lê os dados da memória e os transmite ao computador via interface SPI-USB. O software High Speed Data Converter Pro é usado para analisar e salvar os dados brutos. Dessa forma, o MATLAB e outros softwares podem ser usados para *post-processing*.

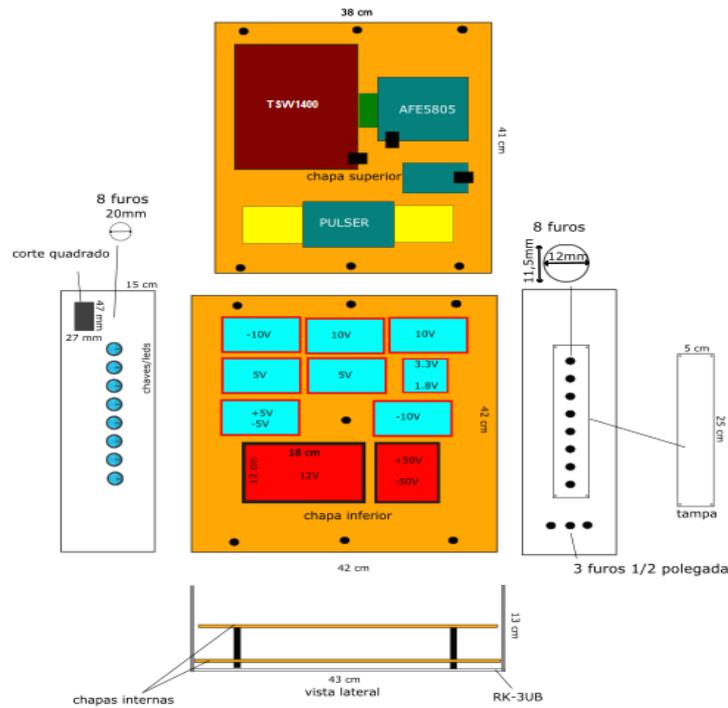
### 3.8 SEQUÊNCIA DE ENERGIZAÇÃO E PROJETO DO CHASSIS

As fontes de alimentação usadas para alimentar o sistema estão indicadas no diagrama da Figura 19. Assim, pode-se observar que uma barreira comum encontrada ao projetar um sistema de ultrassom com tal complexidade é a quantidade de linhas de tensão necessárias para alimentar os circuitos. Ademais, existe uma sequência particular de ligamento e desligamento do sistema que tem que ser obedecida. De outra forma, danos fatais podem ocorrer aos circuitos integrados presentes no sistema.

Para superar esta dificuldade de projeto, um esquema customizado de alimentação foi concebido para facilitar a operação da plataforma. Para tal, foi empregada uma placa contendo 8 relés, um microcontrolador Arduino UNO, e fontes de alimentação chaveadas para atender a exigência de alimentação sequencial. O microcontrolador controla o acionamento das fontes através dos relés, pelo uso de um sensor de nível lógico. Desse modo, o usuário final precisa apenas pressionar um único botão para ligar e desligar o sistema. Isto elimina o risco de danificar os circuitos integrados cruciais para o funcionamento da plataforma.

A sequência de energização e desenergização é feita de modo automático após o disparo pelo acionamento do botão. No Apêndice A está presente o programa usado para esse propósito. Primeiramente, é acionada a fonte de tensão responsável pela linha de tensão VSUB. Esta é a chamada tensão de substrato dos CIs LM96550 (pulsador) e LM96530 (*switch* de transmissão/recepção). É a tensão mais negativa do sistema em relação ao terra e tem o valor de -55V. Na sequência, a fonte responsável pela tensão de +3,3V é ligada. Esta é a tensão de alimentação lógica (entrada e saída digital) dos CIs do pulsador, *switch* de transmissão/recepção e LM96570 (*beamformer*). Após, a tensão de 1,8V é acionada, a qual corresponde às alimentações analógica e digital do CI do *beamformer*. A sequência segue com as tensões simétricas de  $\pm 5V$ , responsável pela alimentação do *switch* de transmissão/recepção, e  $\pm 10V$ , responsável por alimentar parte do circuito lógico do pulsador. Por fim, é acionada outra tensão simétrica de  $\pm 10V$  e na sequência  $\pm 50V$ , por meio do conversor DC-DC. Esse sequenciamento é feito de modo que quando a tensão simétrica de  $\pm 50V$  estiver ativa, a diferença nas linhas de +10V e -10V resultem em uma tensão simétrica de  $\pm 40V$ . Esta é a tensão simétrica flutuante do pulsador e a de  $\pm 50V$  a alimentação de alta tensão do pulsador. Após o uso do sistema, o desligamento é feito impreterivelmente pressionando novamente o botão. Este procedimento é necessário para que a desenergização seja feita de modo inverso à energização, imprescindível para a manutenção da plataforma (TEXAS INSTRUMENTS, 2014).

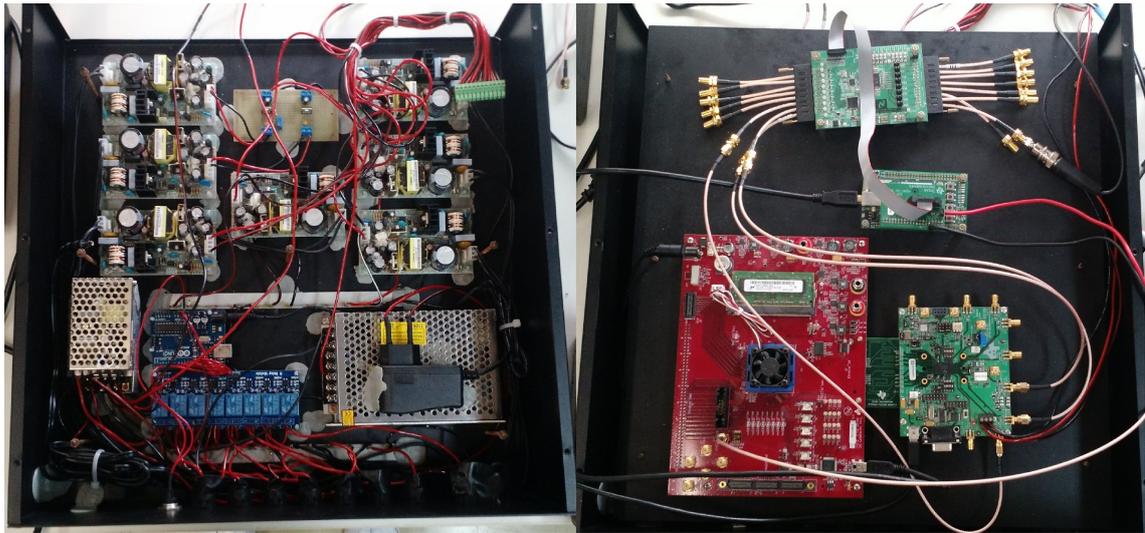
Um gabinete foi projetado para acomodar as fontes e os kits de desenvolvimento, assim como os indicadores luminosos e o botão de acionamento. A Figura 20 mostra o projeto do gabinete. Observa-se que ele consiste de dois níveis para separar os circuitos dos kits de desenvolvimento, da parte de alimentação e energia elétrica.



**Figura 20: Projeto do Gabinete da Plataforma de Ultrassom.**

**Fonte: OFUCHI**

Após organização do cabeamento, as saídas de alimentação foram dispostas em um chicote, obedecendo o sequenciamento das linhas de tensão da placa do kit de desenvolvimento Texas Instruments TX-SDK-V2. O plug de conexão foi fornecido junto ao kit, como pode ser visto na Figura 21 à esquerda. A Figura 22 mostra o painel frontal. Nela, pode ser observado o botão de acionamento e os indicadores luminosos dos estados das linhas de tensão.



**Figura 21: A Plataforma de Ultrassom. O nível inferior do chassis à esquerda compreende as fontes de alimentação, microcontrolador e a placa com os relés. O nível superior à direita compreende os kits de desenvolvimento.**

**Fonte: Autoria Própria**



**Figura 22: Painel Frontal do Chassis. O sistema é ligado e desligado pressionando o botão verde. Os botões azuis servem apenas como uma indicação luminosa para o estado das linhas de tensão.**

**Fonte: Autoria Própria**

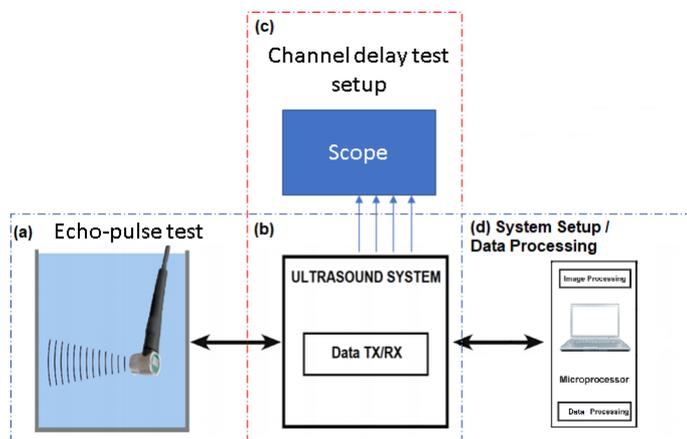
### 3.9 OS ENSAIOS

Inspeções via ultrassom podem ser feitas em uma ampla gama de amostras, materiais e organismos vivos incluindo tecidos, plásticos e metais. Por exemplo, quando um tumor está presente em tecidos moles, o ultrassom pode detectá-lo pela reflexão da onda e seu consequente

eco, devido à uma diferença de impedância entre o tecido e o tumor (RATNAKAR; ZHOU, 2011).

Ensaio foram feitos para avaliar a performance da plataforma. Adequadamente, inspeções Pulso-Eco e uma demonstração *Phased Array* foram realizadas em estruturas e corpos de prova com esse objetivo.

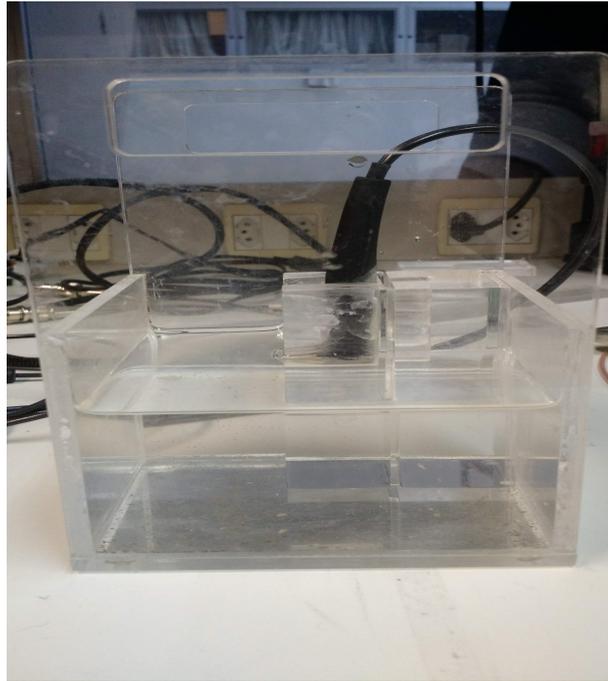
De modo padrão, todos os oito canais da Plataforma contam com uma carga de teste (*dummy load*) em suas saídas. A carga simula um transdutor ordinário e compreende um capacitor de  $330\mu\text{F}$  e um resistor de  $2,49\text{k}\Omega$  em paralelo. Para a conexão de uma sonda transdutora, é necessária a remoção do capacitor do canal em questão (TEXAS INSTRUMENTS, 2014). A Figura 23 mostra a configuração do sistema para ensaios, nos quais a transmissão e recepção do pulso de ultrassom é realizada.



**Figura 23: Representação da Configuração do Sistema. (a) Configuração do Ensaio Pulso-Eco. Até 8 transdutores podem ser conectados à plataforma. (b) A Plataforma de Ultrassom. (c) Visualização em Tempo Real de Atrasos entre canais no osciloscópio. (d) Configuração do Sistema e Processamento de Dados**

**Fonte: Autoria Própria**

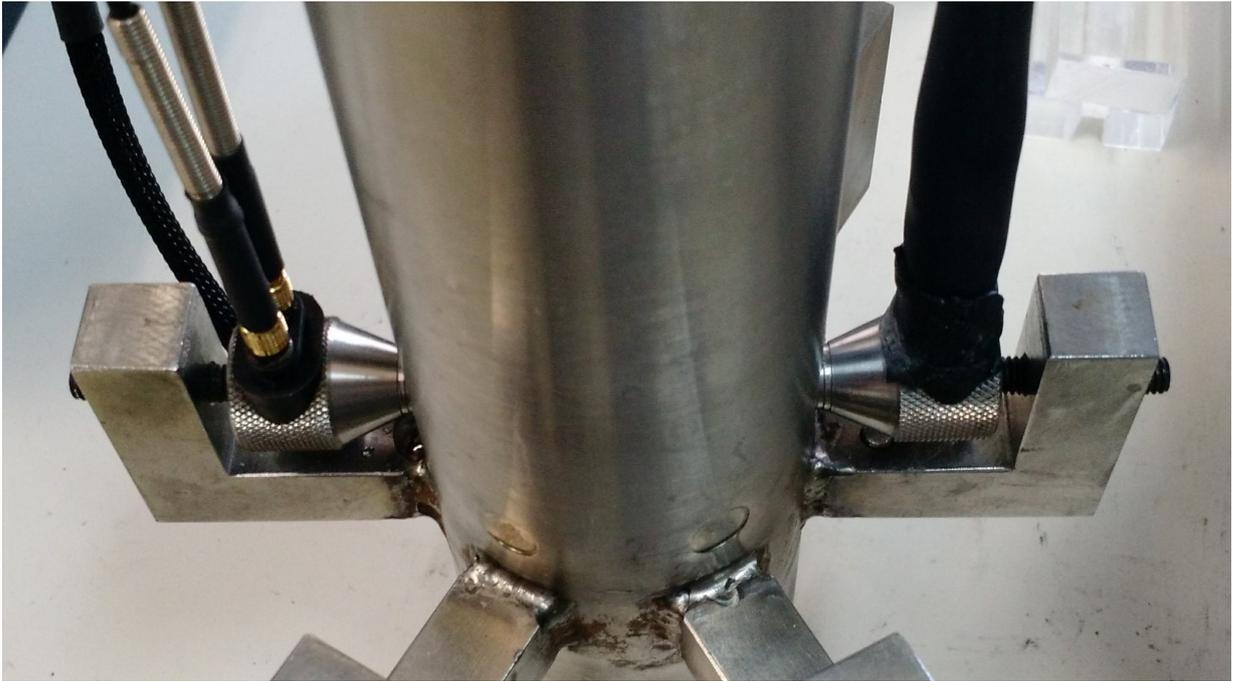
A Figura 24 mostra o ensaio cujo objetivo foi avaliar a espessura de uma cuba de acrílico completada com água. Ela foi feita através do transdutor Olympus DHC711 submerso na estrutura. A água agiu como acoplante, e os ecos recebidos das paredes frontal e traseira permitiram realizar a estimativa do valor da espessura do recipiente.



**Figura 24: Ensaio Pulso-Eco no Contêiner de Acrílico.**

**Fonte: Autoria Própria**

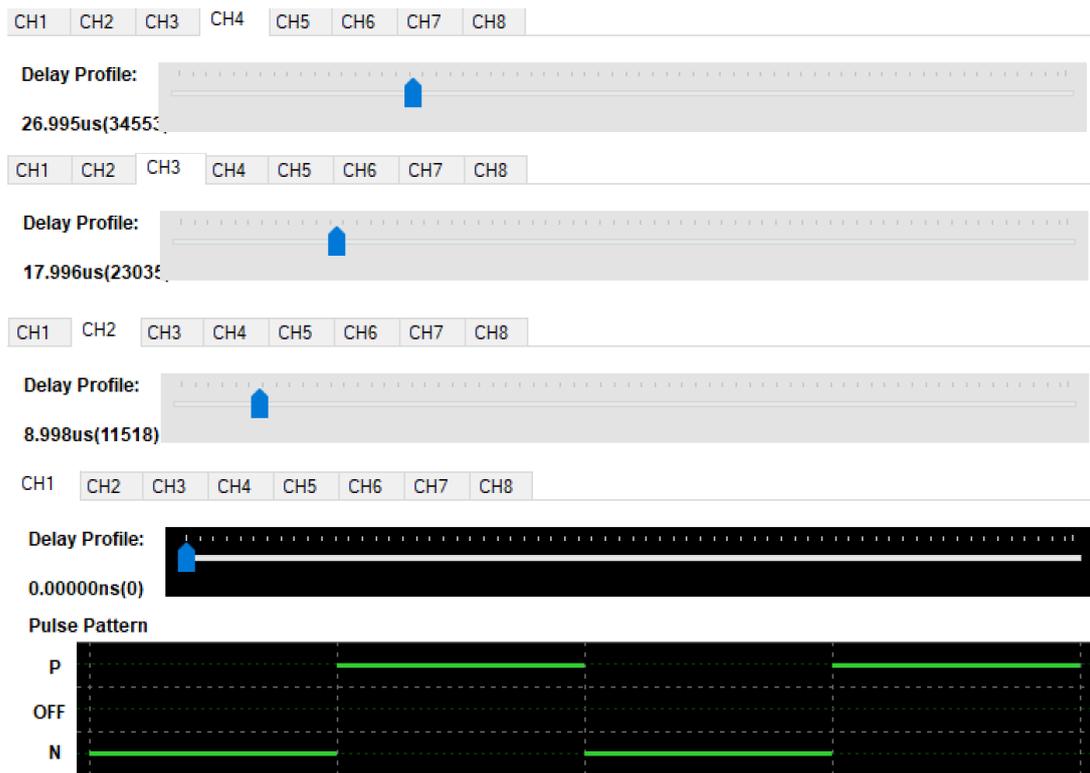
Ensaaios Pulso-Eco diretamente em estruturas sólidas também foram feitos. Para tal, foi aplicado o acoplante glicerina na interface do transdutor-espécime. O corpo de prova de aço foi usado para avaliar a detecção das descontinuidades presentes na estrutura. Além disso, foi avaliada a ocorrência ou não de mascaramento da parede traseira do corpo, em função de descontinuidades no trajeto da onda ultrassônica. Já o cilindro oco de aço preenchido com água foi utilizado para estimar o diâmetro da estrutura. A Figura 25 mostra dois transdutores posicionados no cilindro, que permitiram avaliar o comportamento do pulso de ultrassom nas mudanças da interface aço-água.



**Figura 25: Ensaio Pulso-Eco no Corpo Cilíndrico de Aço.**

**Fonte: Autoria Própria**

Como já comentado, o sistema é capaz de definir atrasos entre cada um dos oito canais. Isto torna possível uma demonstração de configuração *Phased Array*. Com as cargas de teste presentes na placa TX-SDK-V2, uma simulação *Phased Array* compreensiva foi realizada usando 4 canais. O atraso entre canais foi definido em  $9\mu\text{s}$ . O ajuste foi feito através do parâmetro *Delay Profile* do *software* TI Ultrasound Tools, que controla o atraso do pulso de saída relativo ao sinal de *transmit enable*. Esse é o sinal de disparo que habilita a transmissão do pulso de ultrassom dos 8 canais simultaneamente. Portanto, o valor de atraso aumentou em um passo de  $9\mu\text{s}$  até o último canal do conjunto *Phased Array*, como visto na Figura 26.



**Figura 26:** Configuração do Atraso entre Canais no Software TI Ultrasound Tools. É possível ver o atraso dos Canais em relação ao disparo com os seguintes valores:  $9 \mu\text{s}$  do Canal 2,  $18 \mu\text{s}$  do Canal 3, e  $27 \mu\text{s}$  do Canal 4, sendo assim o atraso entre canais de  $9 \mu\text{s}$ .

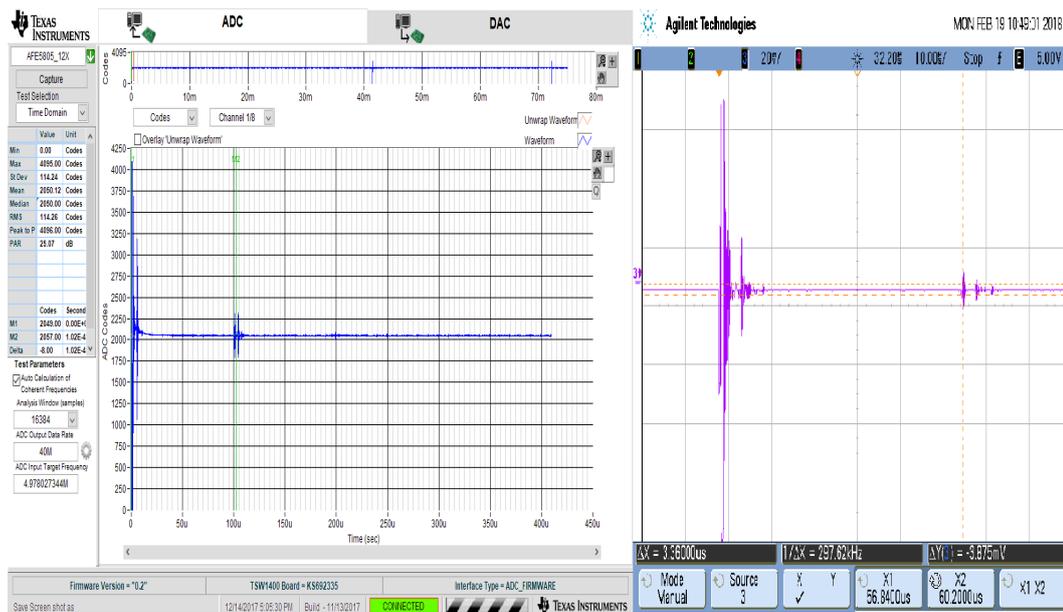
Fonte: Autoria Própria

## 4 RESULTADOS

A seguir são apresentados os resultados práticos, a fim de executar a avaliação do sistema. Os ensaios descritos são expostos qualitativa e quantitativamente. Dessa forma, é possível obter um panorama de possibilidades de aplicação da Plataforma.

### 4.1 ENSAIO DA CUBA DE ACRÍLICO

O ensaio da cuba de acrílico é um bom exemplo de visualização de resultados. A água atuando como acoplante comporta-se como um fluido perfeito para transmissão de ultrassom, pois garante que a interface transdutor-água não seja interrompida pela presença de ar. A configuração empregada para o teste foi inicialmente com um padrão de pulso de 4 divisões ou 2 ciclos (N-P-N-P), e a frequência do pulsador foi definida em 5MHz, casando com a frequência do transdutor Olympus DHC711. O comprimento do padrão foi aumentando sequencialmente para 8, 16 e 32 segmentos, ou seja, 4, 8 e 16 ciclos, respectivamente. À esquerda da figura 27, os dados adquiridos no domínio do tempo são visualizados no *software* High Speed Data Converter Pro. À direita, o resultado equivalente é visualizado na tela do osciloscópio. Com isso, as reflexões das paredes frontal e traseira puderam ser observadas.



**Figura 27:** Captura de Tela das Representações *A-Scan* do Ensaio Submerso. À esquerda é visualizado o *A-Scan* dos dados adquiridos no *software High Speed Data Converter Pro*, e à direita o equivalente em tempo real no osciloscópio.

**Fonte:** Autoria Própria

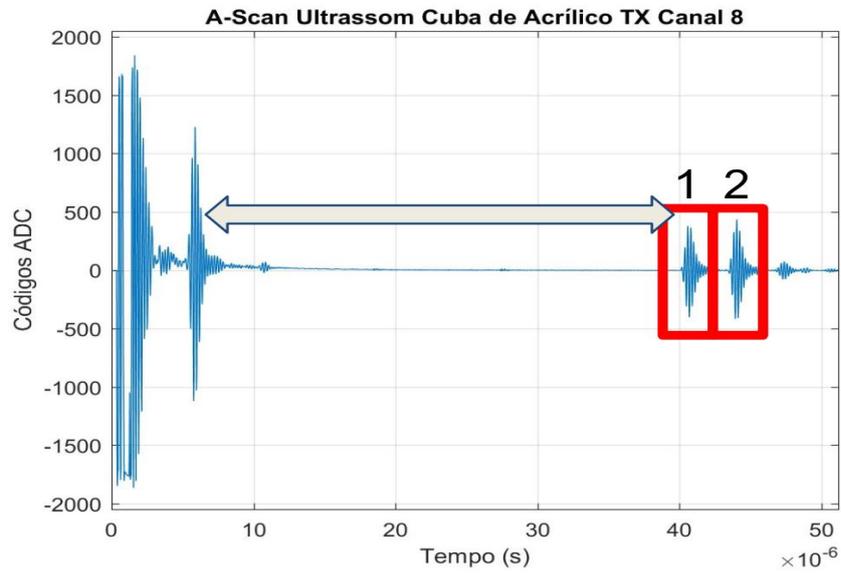
Acima, para uma primeira demonstração, mostrou-se apenas o mesmo canal transmitindo e recebendo o pulso de ultrassom. Apesar de o mesmo cristal piezoelétrico suportar os fenômenos direto e inverso, essa situação não é a adequada para um transdutor de duplo elemento. O ensaio foi feito na sequência utilizando dois canais para transmissão e recepção.

A taxa de amostragem do ADC é de 40MHz. Com o consequente armazenamento, os dados brutos foram manipulados para análise no MATLAB. No Apêndice B é apresentado o *script* MATLAB usado para esse fim.

Com o padrão de pulso de 2 ciclos foram plotados os sinais no domínio do tempo e da frequência. A Figura 28 mostra o *A-Scan* de transmissão. Já a Figura 29 mostra o *A-Scan* de recepção. É possível observar o eco da parede frontal em 1 e o da parede traseira em 2. O tempo de ida e volta do pulso transmitido até a primeira parede está representado pela seta.

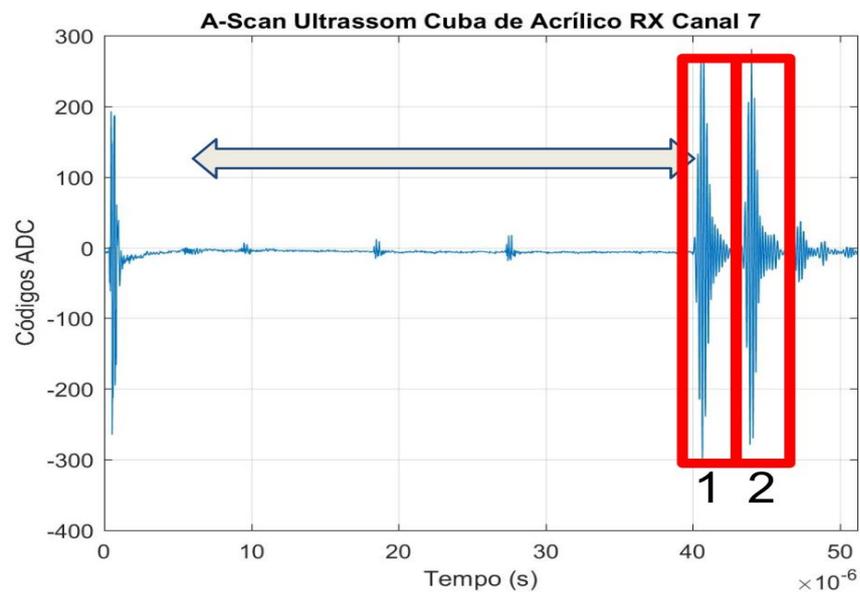
No *A-Scan* de recepção, não estão presentes o pulso transmitido pelo transdutor localizado em torno de  $6 \mu\text{s}$  e o pulso de excitação no início da janela. Assim, observa-se uma maior resolução próxima à superfície no cristal que está recebendo a onda ultrassônica. Ademais, os pulsos de eco são evidenciados na janela de recepção. Ainda, existe um pequeno sinal observado no início da janela de recepção devido ao acionamento do circuito do pulsador, mesmo com o pulso desligado (OFF) no canal do cristal de recepção. No entanto, sua amplitude

é bem reduzida comparada a do pulso de excitação e transmissão no início da janela de transmissão da Figura 28.



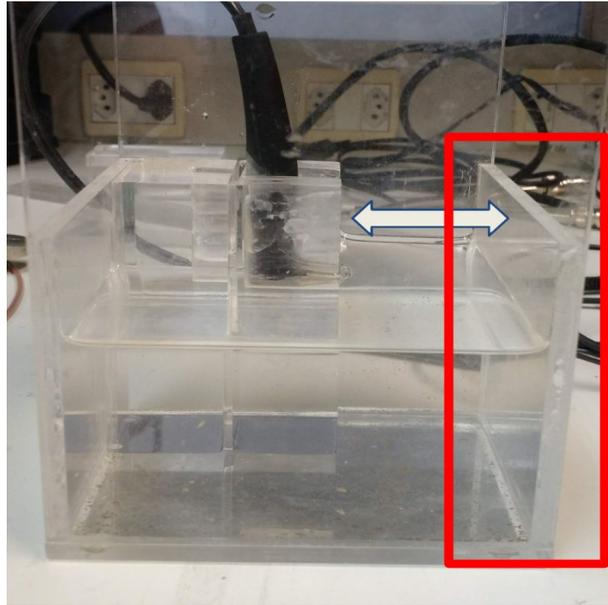
**Figura 28:** A-Scan de Transmissão do Ensaio da Cuba de Acrílico.

Fonte: Autoria Própria



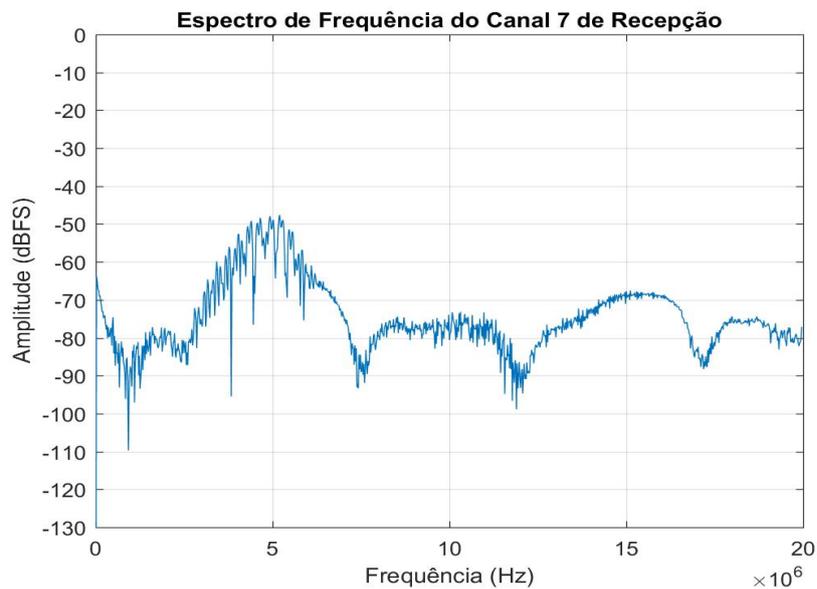
**Figura 29:** A-Scan de Recepção do Ensaio da Cuba de Acrílico.

Fonte: Autoria Própria



**Figura 30: Correspondência do A-Scan com a Cuba Submetida ao Ensaio.**

**Fonte: Autoria Própria**



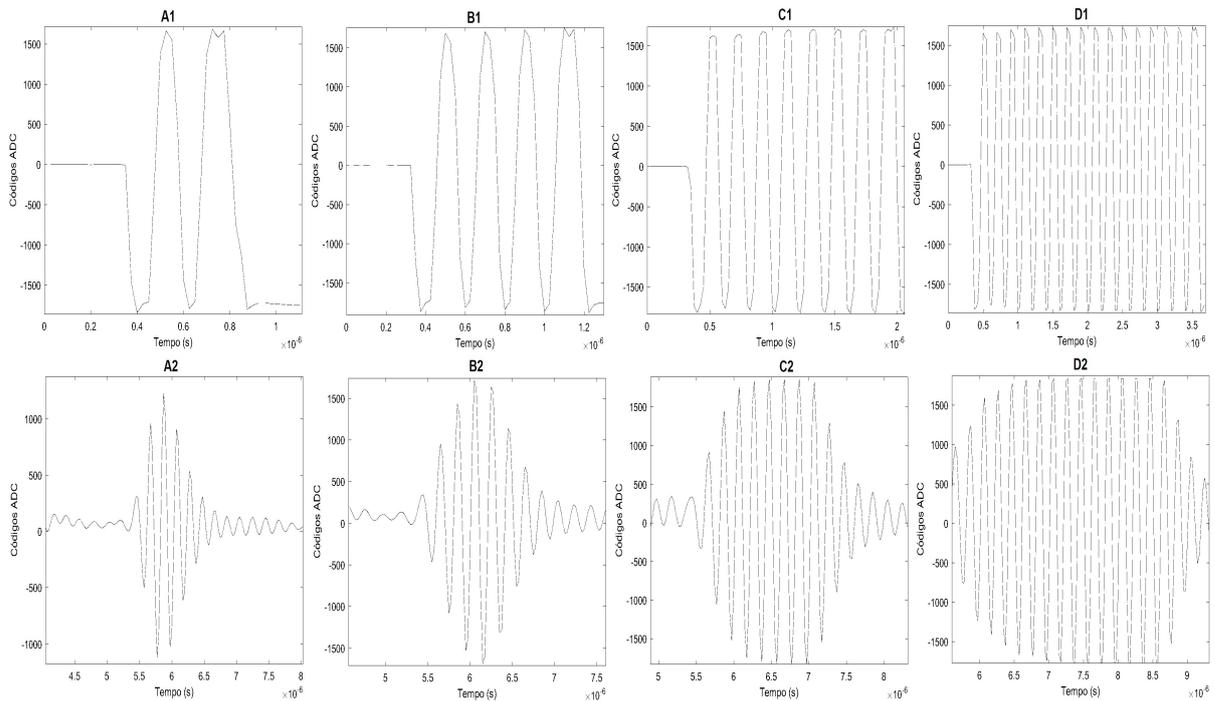
**Figura 31: Espectro de Frequências do Ensaio da Cuba de Acrílico.**

**Fonte: Autoria Própria**

Na Figura 30 observa-se a correspondência entre o A-Scan obtido e o ensaio em si. Com relação ao sinal no domínio do tempo, é preciso levar em consideração a presença de ruídos nos resultados práticos, e a janela em análise que não é ocupada inteiramente pelo pulso de ultrassom. Ainda assim, o espectro de frequências da Figura 31 apresenta a maior magnitude

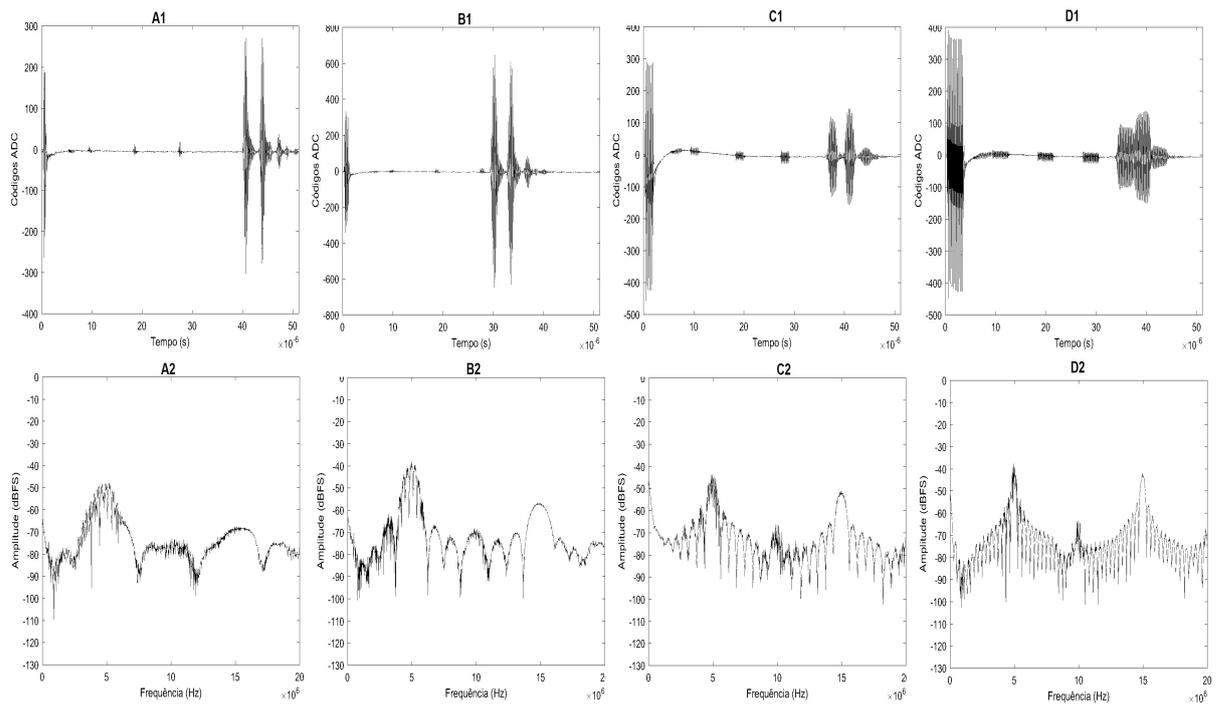
em 5 MHz, que é a frequência característica do transdutor em uso.

Na posição em que o transdutor se encontrava, as paredes frontal e traseira da cuba foram detectadas em  $40,5 \mu\text{s}$  e  $44 \mu\text{s}$ , respectivamente. Os picos dos ecos foram usados para calcular o tempo de propagação. Considerando o intervalo no qual o pulso desloca-se pelo acrílico e  $v_{\text{acrílico}} = 2700 \text{ m/s}$ , obteve-se uma espessura de  $0,47 \text{ cm}$ , enquanto que a espessura real é de  $0,5 \text{ cm}$ . A seguir, apresentam-se os resultados obtidos com o aumento do comprimento do pulso de excitação.



**Figura 32: O sinal Emitido pelo Pulsador e a Forma de Onda do Transdutor. Cada coluna mostra na janela superior o pulso de excitação emitido pelo pulsador e na janela inferior o correspondente pulso ultrassônico emitido pelo transdutor.**

**Fonte: Autoria Própria**



**Figura 33: A Recepção do Eco Devido a Pulsos de Excitação com 2, 4, 8 e 16 ciclos, respectivamente nas janelas A1, A2, A3 e A4. Na janela superior de cada coluna é mostrado a recepção do eco e na janela inferior o correspondente espectro de frequências.**

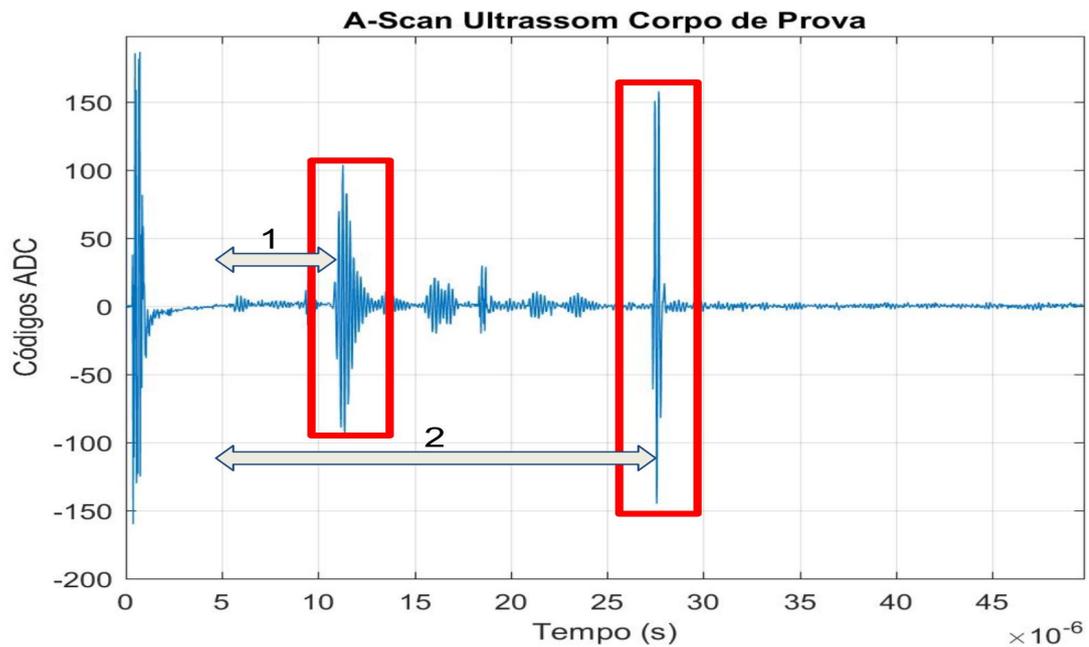
**Fonte: Autoria Própria**

As quatro colunas da esquerda para a direita da Figura 32 mostram os resultados obtidos com a transmissão de pulsos N-P-N-P com 2, 4, 8 e 16 ciclos, respectivamente. Observa-se o sinal transmitido pelo pulsador na parte superior e o correspondente pulso emitido pelo transdutor na parte inferior. Nota-se um gradual aumento da amplitude de transmissão da onda ultrassônica pelo transdutor.

A figura 33 apresenta os resultados correspondentes de recepção dos ecos. Percebe-se claramente uma diminuição da resolução axial na recepção, em função de um grande comprimento do pulso de transmissão. Assim, é notável que os ecos das paredes frontal e traseira tornam-se eventualmente inseparáveis à medida que o pulso aumenta. Uma boa condição foi encontrada com a transmissão do pulso com comprimento de 8 segmentos (4 ciclos) para o transdutor de 5 MHz. Obteve-se boa resolução e amplitude dos ecos para essa configuração.

## 4.2 ENSAIO DO CORPO DE PROVA DE AÇO

Para este ensaio, foi aplicado um pulso com comprimento de quatro ciclos N-P-N-P na frequência de 5MHz. Foi avaliada a maior descontinuidade com diâmetro de 1 cm.



**Figura 34: A-Scan do Corpo de Prova.**

**Fonte: Autoria Própria**



**Figura 35: Correspondência do A-Scan com o Corpo de Prova Submetido ao Ensaio.**

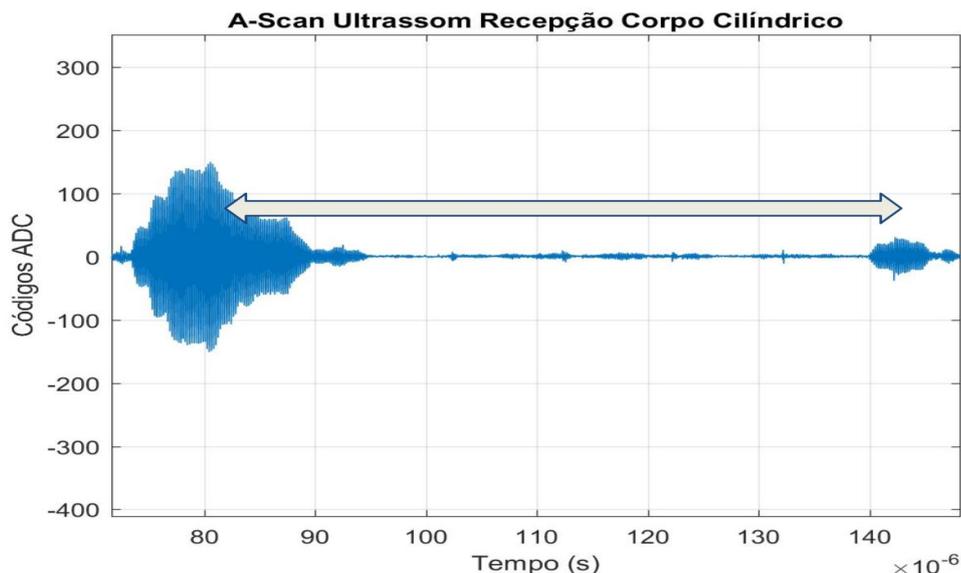
**Fonte: Autoria Própria**

A Figura 34 apresenta o *A-Scan* de recepção do ensaio. Em aproximadamente  $6 \mu\text{s}$  localiza-se o pulso transmitido pelo transdutor, não visualizado na janela de recepção. Os tempos de recepção dos pulsos de eco em relação à descontinuidade e a parede traseira estão simbolizados pelas setas com os números 1 e 2, respectivamente. Observa-se a detecção da descontinuidade em  $11,3 \mu\text{s}$  e da parede traseira em  $27,6 \mu\text{s}$ . Com isso, não houve mascaramento da parede na inspeção. O pulso transmitido de ultrassom localiza-se em  $6 \mu\text{s}$ . Subtraindo esse tempo e considerando  $v_{aco} = 5800 \text{ m/s}$ , obtiveram-se os valores de  $1,54 \text{ cm}$  e  $6,26 \text{ cm}$  para as distâncias da descontinuidade e da parede traseira, respectivamente em relação ao transdutor.

A Figura 35 mostra a correspondência dos tempos de recepção dos ecos sobrepostos ao Corpo de Prova.

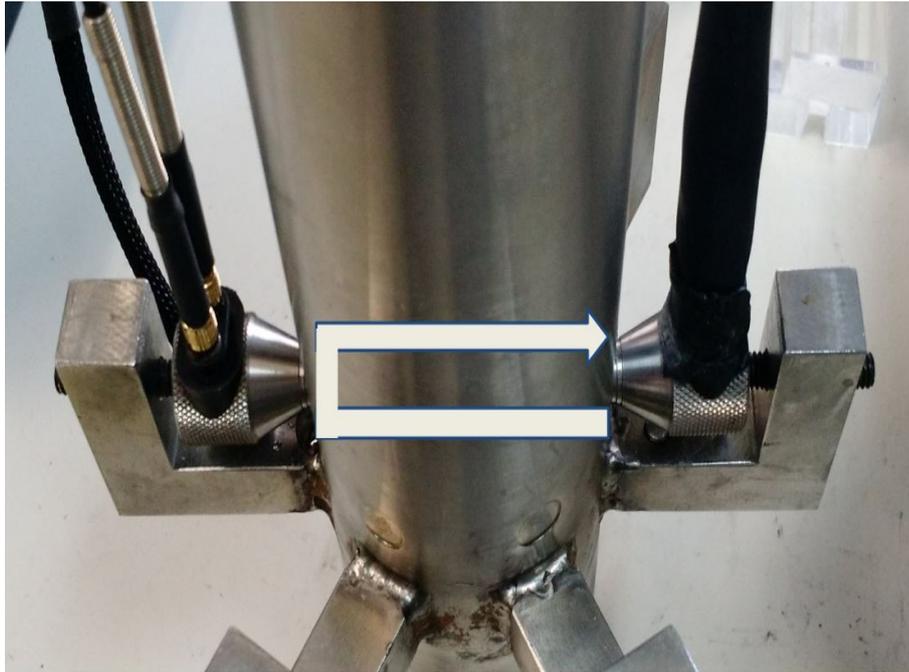
#### 4.3 ENSAIO DO CORPO CILÍNDRICO DE AÇO

Este ensaio teve o objetivo de determinar a espessura do corpo cilíndrico oco de aço. Completado com água, pôde-se observar as múltiplas reflexões do pulso ultrassônico no contato do fluido com a parede interna do cilindro. Além disso, parte do pulso propagou-se nas mudanças de interface aço-água, com uma espessura de parede do cilindro de  $0,4 \text{ cm}$ . Esses fatos resultaram em uma considerável perda de energia do pulso. Assim, configurou-se o pulsador para transmitir um pulso longo no formato N-P-N-P com 64 divisões (32 ciclos).



**Figura 36: A-Scan de Recepção do Corpo Cilíndrico.**

**Fonte: Autoria Própria**



**Figura 37: Correspondência do tempo de propagação do A-Scan com o Cilindro Submetido ao Ensaio.**

**Fonte: Autoria Própria**

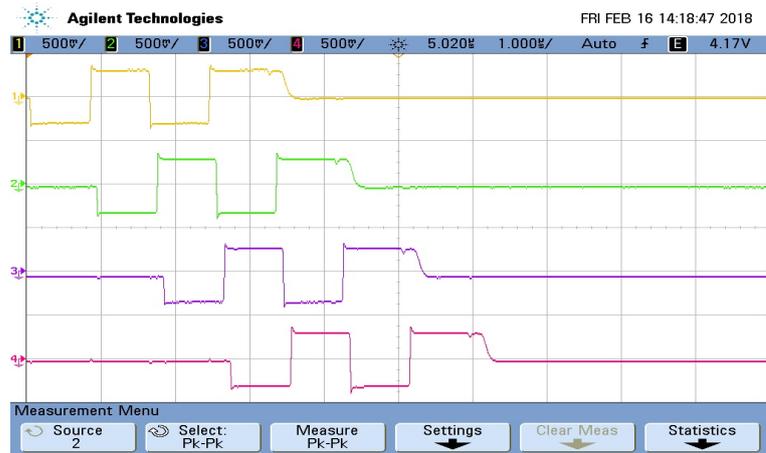
A Figura 36 mostra dois ecos sucessivos da parede oposta do transdutor. A Figura 37 mostra a correspondência do cilindro com o transdutor e o tempo de recepção de dois ecos sucessivos do A-Scan.

A partir do princípio de múltiplas reflexões da onda ultrassônica, considerou-se os dois ecos sucessivos e o seu intervalo para o cálculo do diâmetro do corpo. Com os tempos de  $80 \mu s$  e  $143 \mu s$  e  $v_{agua} = 1480 m/s$ , obteve-se um resultado de 4,7 cm para o diâmetro real de 5 cm.

#### 4.4 DEMONSTRAÇÃO PHASED ARRAY

A transmissão e aquisição simultânea de pulsos ultrassônicos abre uma ampla gama de possibilidades para *post-processing*. Uma delas é o processamento de sinais e reconstituição de imagens de ensaios *Phased Array*, úteis ao analisar tecidos e estruturas de áreas consideráveis.

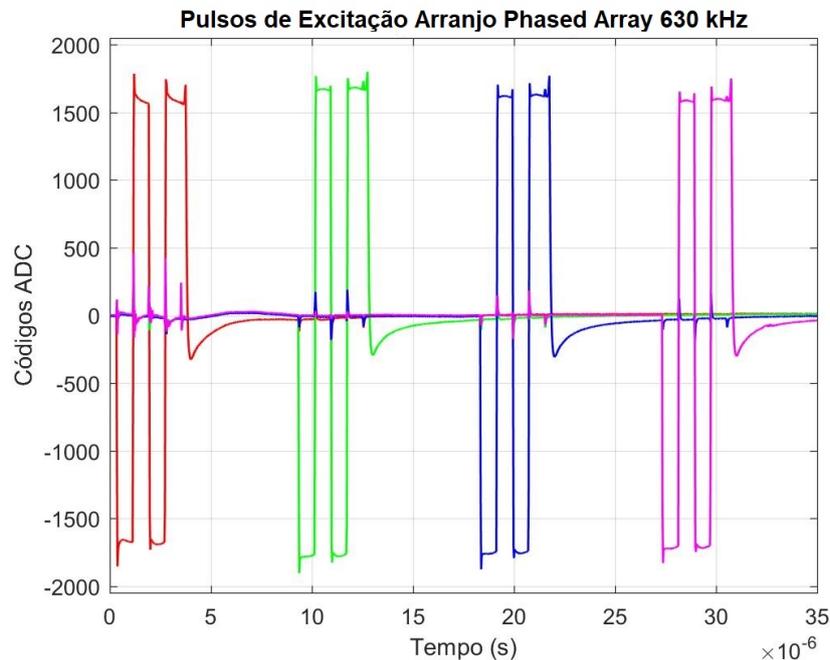
A figura 38 mostra a demonstração *Phased Array* na tela do osciloscópio. Foram definidos para 4 canais, pulsos de excitação de 2 ciclos para a transmissão. Além disso, há um atraso constante entre os pulsos de canais sucessivos.



**Figura 38: Captura de Tela do Osciloscópio demonstrando a configuração *Phased Array*. Quatro pulsos de excitação são visualizados com o mesmo instante de disparo mas sucessivamente atrasados quanto a seu início.**

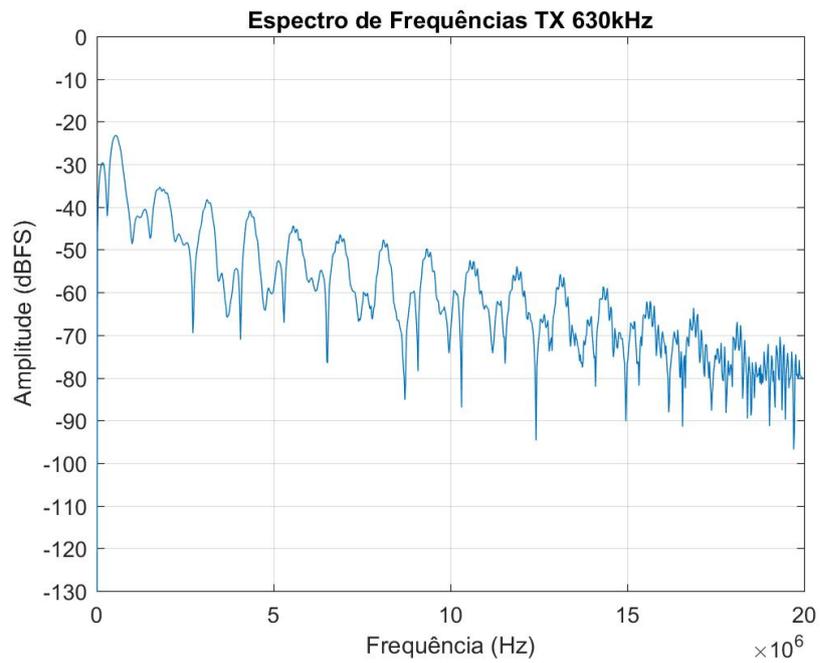
**Fonte: Autoria Própria**

Foram feitos ensaios com a frequência do pulsador em 630 kHz e 1,25 MHz para a demonstração. Abaixo, são mostrados os resultados adquiridos:



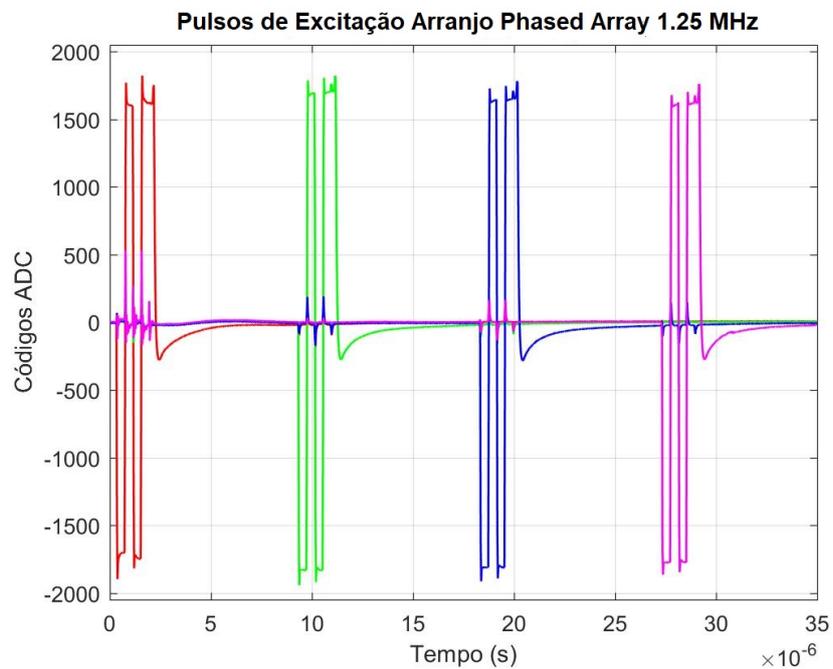
**Figura 39: Pulsos de Excitação do Arranjo Phased Array 630 kHz. O Pulso do Canal 1 apresenta a cor vermelha seguindo até o Pulso do Canal 4 em rosa.**

**Fonte: Autoria Própria**



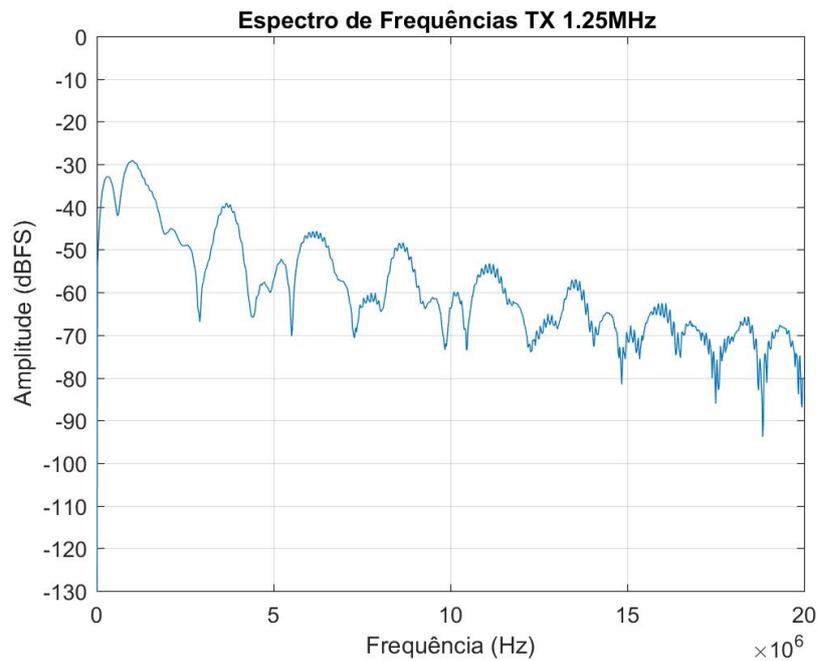
**Figura 40: Espectro de Frequências do Arranjo Phased Array 630 kHz.**

**Fonte: Autoria Própria**



**Figura 41: Pulsos de Excitação do Arranjo Phased Array 1,25 MHz. O Pulso do Canal 1 apresenta a cor vermelha seguindo até o Pulso do Canal 4 em rosa.**

**Fonte: Autoria Própria**



**Figura 42: Espectro de Frequências do Arranjo Phased Array 1,25 MHz.**

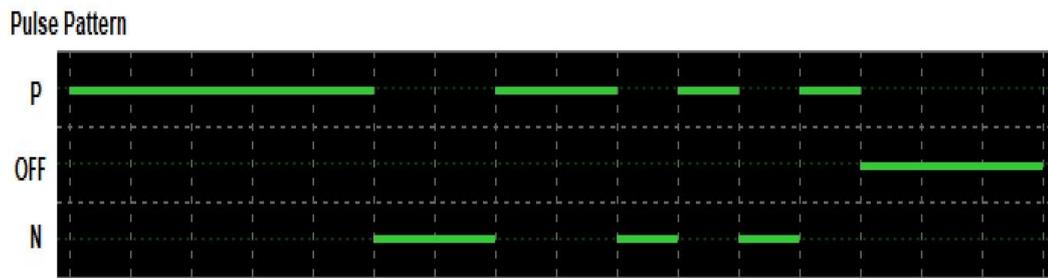
**Fonte: Autoria Própria**

Observa-se a maior magnitude do espectro nas Figuras 40 e 42 para as respectivas frequências do pulsador. As Figuras 39 e 41 apresentam as plotagens dos pulsos de excitação para os quatro canais em uma mesma janela. Elas permitem observar que a partir do disparo de transmissão, há uma defasagem de  $9 \mu\text{s}$  entre canais sucessivos. Apesar de não representar uma aplicação real *Phased Array*, na qual são usadas dezenas ou centenas de cristais, o sistema oferece uma demonstração compreensiva da referida técnica.

#### 4.5 MANIPULAÇÃO E PROCESSAMENTO DOS DADOS BRUTOS

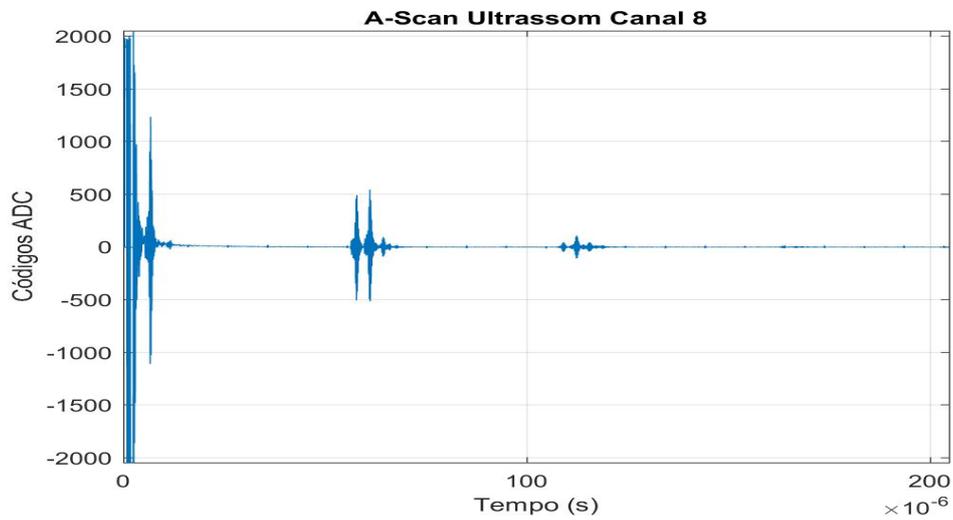
Há uma grande faixa de opções de manipulação de dados adquiridos por uma plataforma aberta. É o que será demonstrado a seguir a partir dos dados brutos adquiridos.

Foi feito um ensaio na cuba de acrílico usando compressão de Pulso Barker de 13 bits. Desse modo, apresenta-se na Figura 43 o padrão de pulso de excitação definido da seguinte forma: P-P-P-P-P-N-N-P-P-N-P-N-P-OFF-OFF-OFF. Neste caso, o mesmo cristal foi usado para transmissão e recepção para simplificar o processo. Os dados salvos do ensaio foram usados para pós-processamento.



**Figura 43: Pulso Barker Configurado no *software* TX-SDK-V2.**

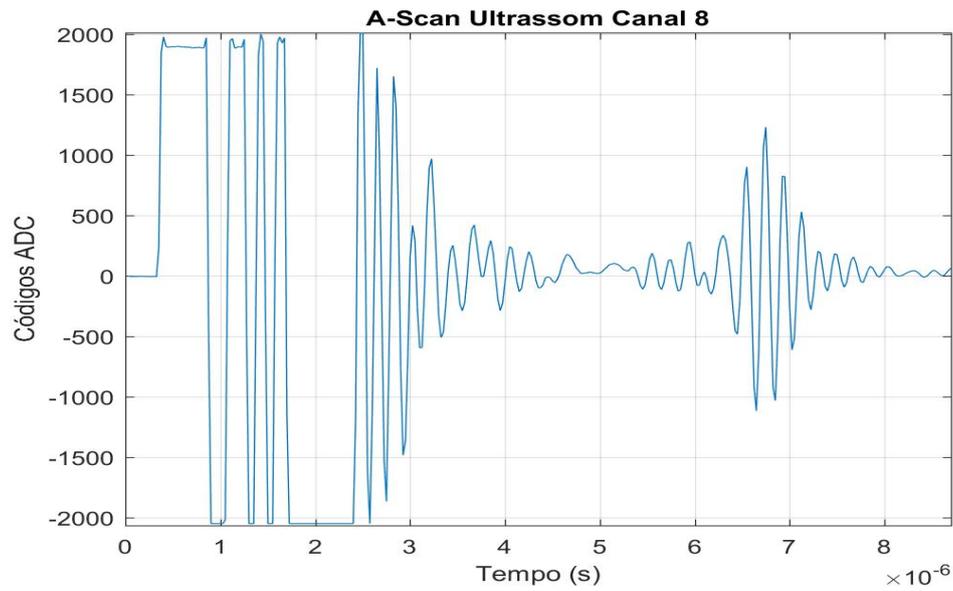
**Fonte: Autoria Própria**



**Figura 44: A-Scan do Ensaio com Pulso Barker. É possível visualizar de forma clara os ecos.**

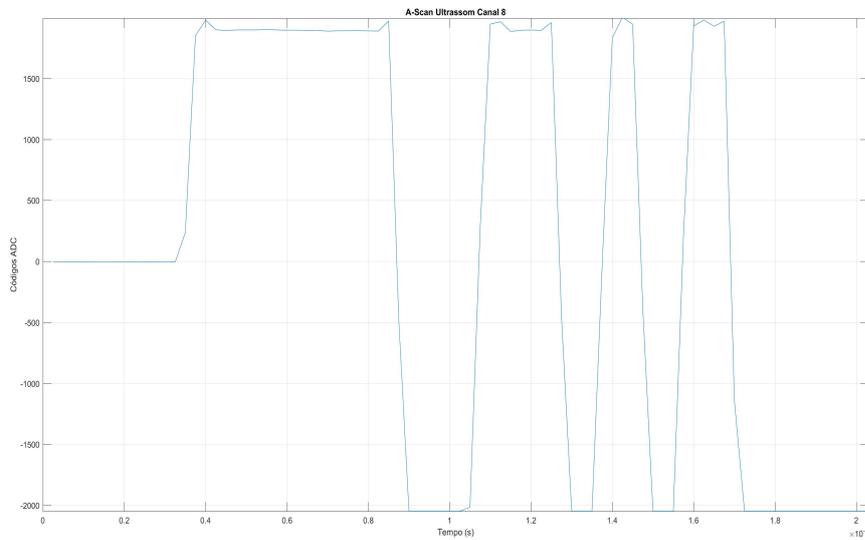
**Fonte: Autoria Própria**

A Figura 44 apresenta o *A-Scan* com os ecos das paredes da cuba de acrílico perfeitamente visíveis.



**Figura 45: Detalhamento do Pulso Barker e a Forma de Onda do Transdutor.**

**Fonte: Autoria Própria**

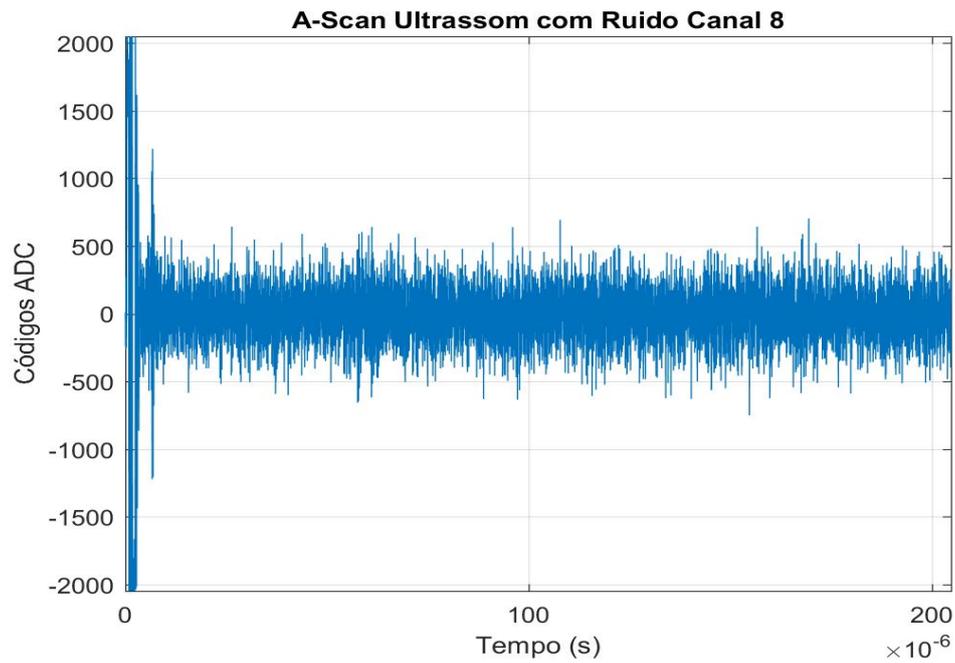


**Figura 46: Pulso Barker Transmitido.**

**Fonte: Autoria Própria**

A Figura 45 apresenta o pulso Barker de excitação e o pulso emitido pelo transdutor perto de  $7 \mu\text{s}$ . A Figura 46 mostra o pulso Barker em função do tempo em uma janela maior.

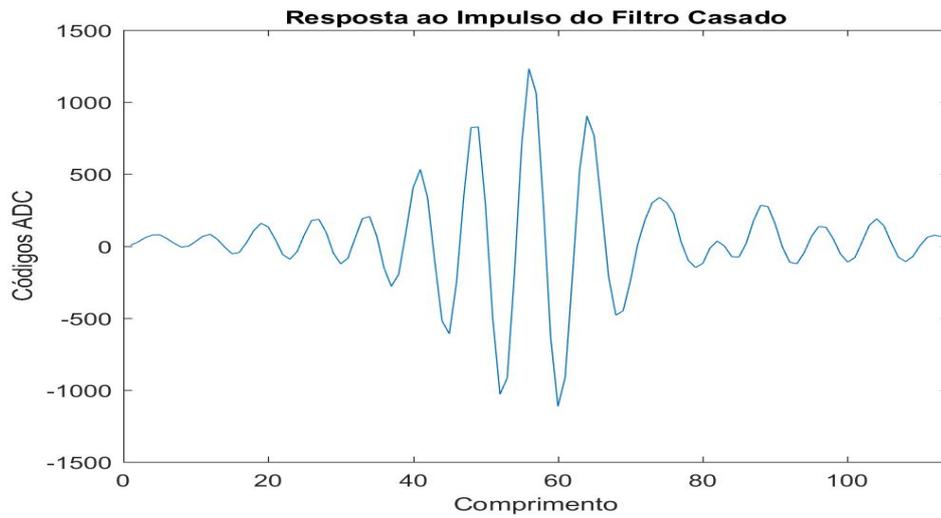
Supondo que o sinal seja afetado por um ruído extremo, adicionou-se ao sinal adquirido um ruído gaussiano de média zero. O seguinte resultado indesejado é observado na Figura 47:



**Figura 47: A-Scan Afetado por Ruído.**

**Fonte: Autoria Própria**

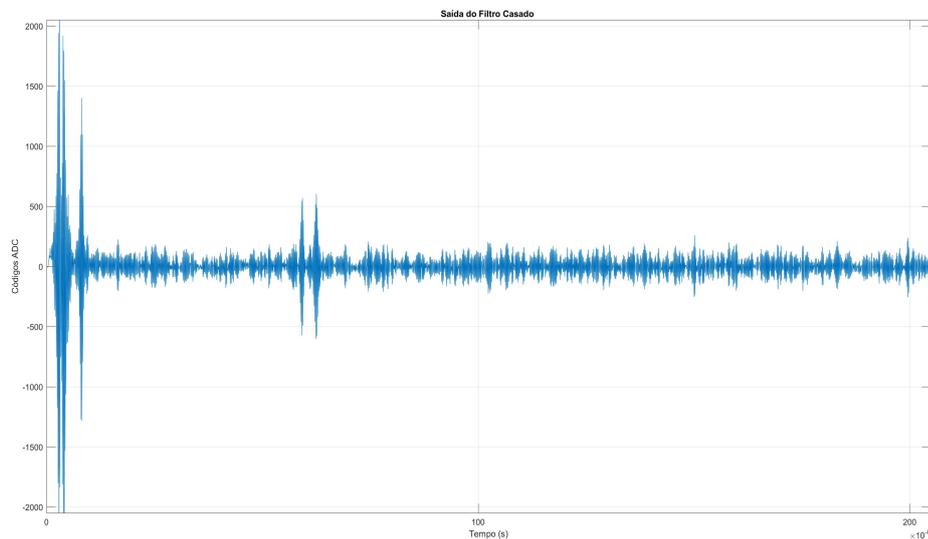
Observa-se a impossibilidade de detectar ecos no sinal. Entretanto, um filtro casado pode ser uma solução plausível para contornar esse problema. A Figura 48 apresenta a forma de onda do transdutor invertida no tempo, a qual é usada como resposta ao impulso no filtro aplicado ao sinal com ruído. Por ser um sinal transmitido conhecido é coerente que ela seja usada para tal fim.



**Figura 48: Resposta ao Impulso do Filtro Casado.**

**Fonte: Autoria Própria**

A Figura 49 apresenta a saída do filtro casado. Os picos com maior amplitude mostram os pulsos de eco - até então mascarados no sinal ruidoso - visíveis novamente. Essa é uma demonstração das possibilidades de manipulação dos dados brutos adquiridos.



**Figura 49: Saída do Filtro Casado.**

**Fonte: Autoria Própria**

## 5 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo apresentar a implementação e funcionamento de um sistema de ultrassom, com foco na pesquisa e desenvolvimento. Os ensaios Pulso-Eco, a demonstração *Phased Array*, configurações de pulso e atraso entre os canais, provaram a capacidade do sistema de executar vários tipos de ensaios não-destrutivos bem-sucedidos. A posterior visualização dos dados adquiridos, bem como sua manipulação, demonstrou a capacidade de pós-processamento do sistema. Assim, mostrou-se que a plataforma é completa, no que diz respeito a assimilar tanto o lado de transmissão como o lado de recepção de ultrassom. Ademais, o projeto de alimentação customizada para o sistema mostrou ser confiável e fácil de operar. O requerimento da alimentação sequencial necessitando de várias linhas de tensão foi cumprido com sucesso.

O ponto principal almejado para o desenvolvimento da plataforma foi o de buscar uma solução aberta, a qual possibilita a liberdade de configuração e acesso aos parâmetros de baixo nível, tanto na etapa de transmissão quanto na etapa de aquisição de dados. Dessa forma, abrem-se várias linhas e possibilidades de pesquisa. Além disso, facilita-se o compartilhamento de informações e dados do sistema. A abrangência de ações possíveis de serem efetuadas a nível de *hardware* e *software* é um atributo importante dentro desse contexto.

Assim, algumas sugestões para trabalhos futuros são listadas. A placa de aquisição e captura de dados TSW1400 dispõe de 1GB de memória. É um considerável espaço para armazenamento de dados de aquisição. Desse modo, podem ser realizados no futuro ensaios *B-Scan*, *C-Scan* e outros procedimentos que utilizem grande espaço de memória.

Além disso, é possível considerar o desenvolvimento de uma API para a Plataforma, integrando *softwares* e definindo rotinas de programação de ensaios e testes. Poderia ser implementada uma aplicação para automatizar processos de inspeção, bem como interfaces gráficas customizadas de acordo com o tipo de ensaio não-destrutivo a ser executado. Uma das possibilidades é o desenvolvimento de um sistema de aquisição e visualização de dados em tempo real.

Este é um campo ainda pouco explorado, a respeito da disponibilidade de partes acessíveis e com facilidade de encontrar. É encorajado a outros indivíduos interessados e instituições a avançar e progredir nesta área. Existe uma grande faixa de aplicações nas quais ensaios não-destrutivos são adequados, de aplicações médicas a inspeções em plantas de geração de energia. O desenvolvimento de soluções customizadas como a descrita aqui é um ponto chave, em um campo consideravelmente restrito como o de ultrassom.

## REFERÊNCIAS

- ANDREUCCI, R. **Ensaio por Ultrassom**. São Paulo: Associação Brasileira de Ensaio Não Destrutivos, 2014.
- CHEEKE, J. D. N. **Fundamentals and applications of ultrasonics waves**. Boca Raton: CRC Press, 2002.
- CHEN, W. H.; DENG, J. L. **Ultrasonic non-destructive testing using Barker code pulse compression techniques**. Taiwan: Ultrasonics 1988, 1987.
- COOPERATIVE INSTITUTE FOR METEOROLOGICAL SATELLITE STUDIES. **What Is MATLAB**. 2018. Disponível em: <<http://cimss.ssec.wisc.edu/wxwise/class/aos340/spr00/whatismatlab.htm>>. Acesso em: 29 de maio de 2018.
- DELISLE, J.-J. **What's the Difference Between Broadband and Narrowband RF Communications?** 2014. Disponível em: <<http://www.mwrf.com/systems/what-s-difference-between-broadband-and-narrowband-rf-communications>>. Acesso em: 29 de maio de 2018.
- EVANS, D. H.; MCDICKEN, W. N. **Doppler ultrasound: physics, instrumentation, and signal processing**. New York: Wiley, 2000.
- GUARNERI, G. A. **An ultrasound system for tumor detection in soft tissues using low transient pulse**. Curitiba: Trabalho de Qualificação (Doutorado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, 2014.
- KRAUTKRAMER, J. H. **Ultrasonic Testing of Materials**. Berlin: Springer-Verlag, 1990.
- LYNNWORTH, L. C. **Ultrasonic Measurements for Process Control: Theory, Techniques, applications**. San Diego: Academic Press, 1989.
- MICROCHIP. **High Voltage DC/DC Converter for Ultrasound Transmitter Demoboards**. 2018. Disponível em: <[www.microchip.com/AN-H59DB1](http://www.microchip.com/AN-H59DB1)>. Acesso em: 4 de março de 2018.
- OLYMPUS. **Ultrasonic Transducers**. 2010. Disponível em: <<https://www.sintrol.fi/images/Esitteet/Ultraaaniluotaimet.pdf>>. Acesso em: 29 de maio de 2018.
- OMI, G. M.; TOMINAGA, M. M.; OHASHI, P. I. **Controle da Movimentação, Aquisição e Tratamento de Dados de Transdutor Ultrassônico para Inspeção de Superfícies Metálicas**. Curitiba: Trabalho de Conclusão de Curso, UTFPR, 2015.
- POLLAKOWSKI, M.; ERMERT, H. **Chirp Signal Matching and Signal Power Optimization in Pulse-Echo Mode Ultrasonic Nondestructive Testing**. Bochum: IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 1994.

QUADROS, G. K.; OFUCHI, C. Y. **Manual de Operação da Plataforma**. Curitiba: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2018.

RATNAKAR, A.; ZHOU, M. **An ultrasound system for tumor detection in soft tissues using low transient pulse**. Trieste: IEEE International Conference on Automation Science and Engineering, 2011.

STARCHMAN, D. E.; HYKES, D. L.; HEDRICK, W. R. **Ultrasound physics and instrumentation**. St. Louis: Elsevier Mosby, 2005.

TEXAS INSTRUMENTS. **Evaluation Board for the Ultrasound Transmit Solution**. 2014. Disponível em: <<https://goo.gl/HK5CRz>>. Acesso em: 4 de março de 2018.

TEXAS INSTRUMENTS. **AFE5805 8-Channel Analog Front End for Ultrasound**. 2018. Disponível em: <<http://www.ti.com/product/AFE5805>>. Acesso em: 4 de março de 2018.

TEXAS INSTRUMENTS. **Data Capture / Pattern Generator: Data Converter EVMs With 8 LVDS Lanes up to 1.5Gbps**. 2018. Disponível em: <<http://www.ti.com/tool/TSW1400EVM>>. Acesso em: 4 de março de 2018.

TEXAS INSTRUMENTS. **High-Speed Data Converter Pro Software**. 2018. Disponível em: <<http://www.ti.com/tool/DATACONVERTERPRO-SW>>. Acesso em: 29 de maio de 2018.

**APÊNDICE A – PROGRAMA DE ACIONAMENTO DAS FONTES**

```
int readState = 0;
int pwr = 0;

void setup()
{

    digitalWrite(5, HIGH);
    digitalWrite(6, HIGH);
    digitalWrite(7, HIGH);
    digitalWrite(8, HIGH);
    digitalWrite(9, HIGH);
    digitalWrite(10, HIGH);
    digitalWrite(11, HIGH);
    digitalWrite(12, HIGH);

    pinMode(4, INPUT);

    pinMode(5, OUTPUT);
    pinMode(6, OUTPUT);
    pinMode(7, OUTPUT);
    pinMode(8, OUTPUT);
    pinMode(9, OUTPUT);
    pinMode(10, OUTPUT);
    pinMode(11, OUTPUT);
    pinMode(12, OUTPUT);
}

void loop()
```

```
{  
  
    readState = digitalRead(4);  
  
    if (readState == 0)  
    {  
        if (pwr == 0)  
        {  
            delay(500);  
  
            digitalWrite(6, LOW);  
            delay(4000);  
  
            digitalWrite(7, LOW);  
            delay(4000);  
  
            digitalWrite(8, LOW);  
            delay(4000);  
  
            digitalWrite(9, LOW);  
            delay(4000);  
  
            digitalWrite(10, LOW);  
            delay(4000);  
  
            digitalWrite(11, LOW);  
            delay(4000);  
  
            digitalWrite(12, LOW);  
            delay(4000);  
  
            pwr = 1;  
        }  
    }
```

```
/** */
else
{
    delay (500);

    digitalWrite (12, HIGH);
    delay (8000);

    digitalWrite (11, HIGH);
    delay (4000);

    digitalWrite (10, HIGH);
    delay (4000);

    digitalWrite (9, HIGH);
    delay (4000);

    digitalWrite (8, HIGH);
    delay (4000);

    digitalWrite (7, HIGH);
    delay (4000);

    digitalWrite (6, HIGH);
    delay (4000);

    pwr = 0;
}
}
```

## APÊNDICE B – SCRIPT MATLAB

```

1  function [ status, data ] = show_data(file, num_amostras,
2  num_canais, canal_analise, fs)
3
4  %% Manipulação do Arquivo Binário
5  fileID = fopen(file, 'r');
6  if fileID ~= -1
7
8      data = zeros(num_canais, num_amostras);
9      data_index = zeros(num_canais, 1);
10     num_amostras_rest = num_amostras * num_canais;
11
12     while num_amostras_rest > 0
13         amostras_lidas = 0;
14         if num_amostras_rest > 65536
15             dados_lidos = fread(fileID, 65536, 'int16');
16             amostras_lidas = 65536;
17         else
18             dados_lidos = fread(fileID, num_amostras_rest, 'int16');
19             amostras_lidas = num_amostras_rest;
20         end
21         num_amostras_rest = num_amostras_rest - amostras_lidas;
22
23         % cada linha representa um canal
24         % os dados binarios sao lidos e os oito canais sao preenchidos
25         % com dada amostra a cada iteracao
26         i = 1;
27         while i <= amostras_lidas

```

```

28     for j=1:num_canais
29         if i > amostras_lidas
30             break;
31         end
32         data_index(j) = data_index(j) + 1;
33         data(j,data_index(j)) = dados_lidos(i);
34         i = i + 1;
35     end
36 end
37 end
38
39 fclose(fileID);
40 status = 0;
41 else
42     status = -1;
43 end
44
45 %filter = phased.MatchedFilter
46 %('Coefficients',data(canal_analise,:));
47
48 for i = 1:num_canais
49     for j = 1:num_amostras
50         if data(i,j) == 2048
51             data(i,j) = 0;
52         else
53             data(i,j) = data(i,j) - 2048;
54         end
55     end
56 end
57
58 %% Plotagem no domínio do tempo
59 x = linspace(1,num_amostras,num_amostras);
60 x = x/40e6;
61 figure;
62 plot(x,data(canal_analise,:))

```

```

63 ax = gca;
64 ax.XAxis.Exponent = -6;
65
66 xlim ([0 num_amostras/fs]);
67 ylim([-2048 2048]);
68 grid on;
69 xlabel('Tempo (s)');
70 ylabel('Códigos ADC');
71 title(['A-Scan Ultrassom Canal ', num2str(canal_analise)]);
72
73 pause
74
75 %% Plotagem no Domínio da Frequência
76
77 %normalizar
78
79 num_bits = 12;
80 data_norm = (data(canal_analise, :)-2^(num_bits-1))/2^(num_bits-1);
81
82 N = length(data_norm);
83
84 fft_mod = abs(fft(data_norm, N)/N);
85 fft_mod = fftshift(fft_mod);
86
87 dados_spectrum = zeros(N/2, 1);
88
89 for i=1:N/2-1
90     dados_spectrum(i) = fft_mod(N/2+1+i)+fft_mod(N/2+1-i);
91 end
92 dados_spectrum(1) = 1e-9;
93 freq = fs*[0:N/2-1]/N;
94
95 %plot frequencia
96 figure;
97

```

```

98 plot(freq,20*log10(dados_spectrum)); %decibel
99 axis([0 fs/2 -130 0]);
100 set(gca,'YTick',-130:10:0);
101 ax = gca;
102 ax.XAxis.Exponent = 6;
103
104 grid on;
105 xlabel('Frequência (Hz)');
106 ylabel('Amplitude (dBFS)');
107 title(['Canal ',num2str(canal_analise)]);
108
109 pause
110
111 %% MANIPULACAO COM RUIDO
112
113 % ch8_tx_ch8_rx_5MHz_barker13bit_take1_8192samples_equallyspaced.bin
114 % barker pattern interval: (1,13:69)
115 % pulse interval: (1,212:325)
116 % echo 1: (1,2257:2374)
117
118 % ch8_tx_ch7_rx_5MHz_barker13bit_take2_8192samples.bin
119 % barker pattern interval: (1,13:69)
120 % pulse interval: (1,249:289)
121 % echo 1: (1,2690:2794)
122
123 data = data(canal_analise,:);
124 pontos = (1:length(data));
125 figure
126
127 %% Filtro Casado
128
129 b = flip(data(212:325,1)); %resposta ao impulso template
130 %b = flip(data(325:438,1)); %resposta ao impulso aleatoria
131 %x = linspace(1,118,118);
132 %b = flip(data(2257:2374,1));

```

```

133 x = linspace(1,length(b),length(b));
134 plot (x,b);
135 xlim([0 length(b)]);
136 xlabel('Comprimento');
137 ylabel('Códigos ADC');
138 title('Resposta ao Impulso do Filtro Casado');
139 %xlim([0 117]);
140 pause;
141
142 fim = length(data);
143
144 %ruído=randn(1,fim)*sqrt(110000);
145 %ruído=randn(1,fim)*sqrt(35500);
146 ruído=randn(1,fim)*sqrt(35500);
147 data_orig = data;
148 data=data+ruído';
149
150 figure
151 x = linspace(1,num_amostras,num_amostras);
152 x = x/40e6;
153 plot(x,data);
154
155 ax = gca;
156 ax.XAxis.Exponent = -6;
157 xlim ([0 num_amostras/fs]);
158 ylim([-2048 2048]);
159 grid on;
160 xlabel('Tempo (s)');
161 ylabel('Códigos ADC');
162 title(['A-Scan Ultrassom com Ruído Canal ',num2str(canal_analise)]);
163 pause;
164
165 figure
166 r = filter(b,1,data)/1e4;
167 %r=conv(data,b);

```

```
168 fim=length(r);
169 t=0:1/fs:fim/fs-1/fs;
170 plot(t,r);
171
172 ax = gca;
173 ax.XAxis.Exponent = -6;
174 xlim ([0 num_amostras/fs]);
175 ylim([-2048 2048]);
176 grid on;
177 xlabel('Tempo (s)');
178 ylabel('Códigos ADC');
179 title(['Saída do Filtro Casado ']);
180
181 pause
182
183 %REFERENCIAS TSW1400 DOCUMENTATION
184
185 close all;
186 clear all;
187 end
```