

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

WANDERSON ELEUTÉRIO SALDANHA

**DESENVOLVIMENTO E PROCESSAMENTO DE SINAIS EM
SENSORES ULTRASSÔNICOS DE VAZÃO BASEADOS EM TEMPO
DE TRÂNSITO.**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Automação e Sistemas Elétricos Industriais.

Orientador: Dr. Prof. Edson da Costa Bortoni.

**Dezembro de 2016
Itajubá - MG**

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me permitir ser o que sou e fazer o que faço. Sem Ele nada seria possível ou faria sentido.

A minha família, minha esposa Mariney e meus filhos Leonardo e Lucas, pela paciência e suporte emocional para realização e sucesso desse trabalho.

A meu orientador, Dr. Prof. Edson da Costa Bortoni, pelo apoio, paciência, atenção e esforço em suprir minhas lacunas de conhecimento e experiência, na análise e correção do texto da dissertação, bem como nas informações e conselhos que auxiliaram na elaboração do modelo final e sua realização prática.

A empresa Sense Eletrônica Ltda, pelo suporte técnico e instrumental.

Ao Instituto Nacional de Telecomunicações – INATEL, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Capes e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG pelo apoio e incentivo para o desenvolvimento de pesquisas acadêmicas, que foi a base de todo esse trabalho.

A Universidade Federal de Itajubá e seus dirigentes, pela oportunidade de estudo e desenvolvimento profissional como pesquisador.

Ao Dr. Prof. Alexandre Baratella Lugli, pelos conselhos e orientação em minha caminhada até meu objetivo.

A TODOS, A MINHA ETERNA GRATIDÃO.

Dezembro de 2016

DEDICATÓRIA

Dedico carinhosamente este trabalho a meu pai, José Antônio Saldanha, e minha mãe, Maria Dorotéa Eleutério Saldanha, que sempre foram minhas maiores inspirações para cada passo dado em minha caminhada.

Obrigado!

“Meu propósito é resolver um problema [científico] em conformidade com a experiência (...) e devemos consultar a experiência em uma certa variedade de casos e circunstâncias, até podermos extrair deles uma regra geral que esteja contida nos mesmos (...). Elas nos conduzem a ulteriores investigações da natureza e a criações da arte. Impede-nos de iludirmos a nós mesmos, ou a outros, ao acenarmos com resultados que não possam ser obtidos.”

Leonardo da Vinci (1452-1519)

RESUMO

A fim de promover um estudo sobre o comportamento dos sinais ultrassônicos utilizados nos medidores de vazão baseados no método do tempo de trânsito, neste trabalho, de acordo com o princípio de medição descrito, foi montada uma unidade didática para medição da vazão e desenvolvido um modelo simples deste medidor para identificar as características dos pulsos ultrassônicos que permitem avaliar suas respostas nesta aplicação. Todas as partes e ensaios deste trabalho foram realizados num laboratório de uma instituição de ensino, a fim de incentivar a investigação sobre o tema no futuro. Os circuitos utilizados neste estudo têm baixa complexidade e os custos não são elevados. O objetivo de visualizar os sinais ultrassônicos e a diferença entre tempos de trânsito em ambas as direções de vazão foi alcançado. Para obter sucesso nesse objetivo, alguns circuitos experimentais, a topologia final e os resultados são mostrados neste trabalho. Os resultados experimentais mostram que o método proposto é eficiente na medição da vazão, o erro é reduzido e as variações do tempo de trânsito podem ser facilmente identificadas.

Palavras Chave: medidor de vazão, sinal ultrassônico, tempo de trânsito, transdutor, processamento de sinais.

ABSTRACT

In order to realize a study about the behavior of ultrasonic signals used in flow meters based on transit time method, in this paper, according to the measurement principle described, a didactic plant to flow measurement was assembled and a simple model of this sensor was developed to identify characteristics of the ultrasonic pulses that permit evaluating their responses in this application case. All parts and testing of this work were carried out in a laboratory of an educational institution in order to encourage research on the topic in the future. The circuits used in this study have low complexity and the costs are not expensive. The goal of visualizing the ultrasonic signals and the difference between transit times in both flow directions was obtained. In order to obtain success in these objectives, some circuits experimented and the final topology and results are shown in this paper. The experimental results show that the proposed method is efficient to flow measurement, the error is reduced and the variations of transit time can be easily identified.

Key Words: signal processing, transducer, transit time method, ultrasonic flowmeter, ultrasonic signal.

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

%	porcento.
β	ganho.
Δ	diferença.
λ	comprimento de onda.
μs	microsegundo.
μS	microsiemens.
ρ	densidade.
σ	desvio padrão.
τ	tempo de integração.
φ	ângulo.
ω	freqüência angular.
$^{\circ}\text{C}$	grau Celsius.
$^{\circ}\text{F}$	grau Fahrenheit.
A	amplitude.
a	área.
A/D	analógico para digital.
c	velocidade da onda sonora.
cm	centímetro.
cm^3	centímetro cúbico.
cos	função cosseno.
cv	cavalo.
D	diâmetro.
d.C.	depois de Cristo.
f	freqüência.
F	força.
f.e.m.	força eletromotriz.
g	grama.
galões/min	galões por minuto.
H_{FE}	ganho.
Hz	hertz.
I	intensidade.

K	constante.
kB	quilobit.
kg	quilograma.
kg/h	quilogramas por hora.
k_h	coeficiente hidráulico.
kHz	quilohertz.
LED	<i>light emitting diode</i> (diodo emissor de luz).
litros/min	litros por minuto.
L_w	distância entre as faces dos transdutores.
m	metro.
m/s	metros por segundo.
m^3	metro cúbico.
m^3/h	metros cúbicos por hora.
MHz	megahertz.
MIPS	milhões de instruções por segundo.
mm	milímetro.
mm^3	milímetro cúbico.
N	número de amostras.
Nm^3/h	metros cúbicos normais por hora.
NPN	transistor de base positiva.
ns	nanosegundo.
p	pressão.
P	potência.
PLC	<i>programmable logic controller</i> (controlador lógico programável).
PNP	transistor de base negativa.
psi	libra por polegada ao quadrado (<i>pound square inches</i>).
PVC	policloreto de polivinila.
PWM	<i>pulse-width modulation</i> (modulação por largura de pulso).
s	segundo.
SCFM	pés cúbicos padrão por minuto (<i>standard cubic feet per minute</i>).
sen	função seno.
SMT	<i>souface mount technology</i> (tecnologia de montagem em superfície).
t	tempo.

T	período de um sinal.
T1	transdutor 1.
T2	transdutor 2.
t_{12}	tempo de trânsito do transdutor 1 para o transdutor 2.
t_{21}	tempo de trânsito do transdutor 2 para o transdutor 1.
USB	<i>universal serial bus</i> (porta serial universal).
v	velocidade.
V	volt.
Vdc	volt contínuo.
W	trabalho.
W/cm^2	watt por centímetro quadrado.
W/m^2	watt por metro quadrado.
z	eixo longitudinal.
Z	impedância.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Representação da velocidade das partículas e direção de propagação das ondas [17].	15
Tabela 2 – Soluções da equação da onda unidimensional [18].	16
Tabela 3 – Velocidade média do som em diferentes meios [13].	26
Tabela 4 – Medidas de tempo de trânsito e sinal analógico de saída com vazão nula.	81
Tabela 5 – Resultados com escoamento no sentido do transdutor 1 para o transdutor 2.	82
Tabela 6 – Vazões ideais para as medidas realizadas para vazão de 1 para 2.	85
Tabela 7 – Resultados com escoamento no sentido do transdutor 2 para o transdutor 1.	86
Tabela 8 – Vazões ideais para as medidas realizadas para vazão de 2 para 1.	88

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Espectro de Frequências Sonoras [14].	12
Figura 2 – Variação de intensidade irradiada por um transdutor [16].	14
Figura 3 – Ondas de pressão em função da distância z ; (a) em $t = 0$; (b) em $t = \Delta t$ [18].	17
Figura 4 – Ondas transversais [17].	21
Figura 5 – Ondas longitudinais [17].	21
Figura 6 – Vetores de propagação da onda acústica e da vazão [16].	27
Figura 7 – Princípio de medidor es ultrassônicos por tempo de trânsito [16].	27
Figura 8 – Diagrama explicativo da medida baseada em Tempo de Trânsito [16].	29
Figura 9 – Diagrama de blocos de um medidor ultrassônico por tempo de trânsito utilizando várias amostras para obter uma elevada resolução [13].	31
Figura 10 – Princípio e exemplo dos transdutores ultrassônicos. O elemento sensor pode ser modificado mesmo sobre pressão [13].	32
Figura 11 – Posicionamento axial dos sensores. O pulso ultrassônico passa diretamente pelo eixo axial do tubo [13].	33
Figura 12 – Sensor do tipo radial [12].	33
Figura 13 – Sensor para canais abertos com elemento sensor montado sobre uma esfera móvel [13].	34
Figura 14 – Requisitos mínimos para trecho em linha reta para uma precisão de 1% com um único percurso ultrassônico para medição de tempo de trânsito [13].	35
Figura 15 – Possíveis arranjos de percursos para medidores ultrassônicos de vazão [13].	36
Figura 16 – Dependência do coeficiente hidráulico de correção k_h na medição com um único percurso para o número de Reynolds Re [10].	39
Figura 17 – Transdutores ultrassônicos e possibilidades de montagens [16].	41
Figura 18 – Princípio de funcionamento do medidor de vazão eletromagnético (Lei de Faraday) [25].	47
Figura 19 – Diagrama de blocos do circuito desenvolvido.	50
Figura 20 – Medidor de vazão OPTIFLUX 1000 [25].	54
Figura 21 – Conversor de sinais IFC 050 [26].	55
Figura 22 – Transdutor ultrassônico HJ-3030/1M [27].	56
Figura 23 – Esquema elétrico do circuito inicial utilizado para testar os transdutores [30].	57
Figura 24 – Sinal ultrassônico de excitação dos transdutores.	58

Figura 25 – Sinal ultrassônico enviado e recebido após seu retorno em condições normais...	59
Figura 26 – Sinal ultrassônico enviado e recebido após seu retorno em condições anormais.	59
Figura 27 – Transdutor ultrassônico D-Flow 4MHz [31].	60
Figura 28 – Erros do Transdutor ultrassônico D-Flow 4 MHz em relação a EN1434-1 [33].	60
Figura 29 – Ajuste da janela de transmissão do sinal ultrassônico.	61
Figura 30 – Erros teóricos do sensor de vazão ultrassônico quando alterado o ângulo de radiação [34].	62
Figura 31 – Protótipo mecânico de referência.	63
Figura 32 – Projeto mecânico com referências métricas.	63
Figura 33 – Protótipo mecânico desenvolvido.	63
Figura 34 – Circuito para fornecimento de energia.	65
Figura 35 – Driver de potência para excitação dos transdutores.	66
Figura 36 – Circuito ceifador com BAV99.	66
Figura 37 – Estágio de amplificação com transistores.	67
Figura 38 – Estágio de filtragem.	68
Figura 39 – Estágio de comparação.	68
Figura 40 – Circuito microcontrolador e seus periféricos.	69
Figura 41 – Fluxograma básico para medição da vazão baseado no tempo de trânsito com sinal ultrassônico.	70
Figura 42 – Circuito integrador de saída.	71
Figura 43 – Proposta para planta de testes.	72
Figura 44 – <i>Setup</i> de testes para validação do protótipo desenvolvido.	72
Figura 45 – Sinal de excitação entregue pelo microcontrolador.	74
Figura 46 – Sinal de transmissão aplicado ao transdutor.	74
Figura 47 – Sinais de transmissão e recepção no transdutor.	75
Figura 48 – Sinais de transmissão e recepção equalizados em nível.	75
Figura 49 – Sinais de transmissão e recepção amplificados.	76
Figura 50 – Sinais de transmissão e recepção filtrados.	76
Figura 51 – Sinais de transmissão e recepção convertidos em janelas únicas para medição do tempo de trânsito.	77
Figura 52 – Sinal analógico disponibilizado na saída proporcional a vazão medida.	77
Figura 53 – Estágios de filtragem e amplificação simplificados.	78
Figura 54 – Gráfico com a relação da vazão de 1 para 2 pela relação $(t_{21} - t_{12})/t_{21} \cdot t_{12}$.	83

Figura 55 – Gráfico com a relação da vazão de 1 para 2 pela corrente de saída no padrão de 4 a 20mA.	83
Figura 56 – Gráfico com a relação da vazão de 2 para 1 pela relação $(t_{12} - t_{21})/t_{12} \cdot t_{21}$. 87	87
Figura 57 – Gráfico com a relação da vazão de 2 para 1 pela corrente de saída no padrão de 4 a 20mA.	87

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1	A Onda Sonora.....	12
2.1.1	Tipos de Ondas Sonoras.....	21
2.1.2	Velocidade do Som.....	22
2.1.3	Ultrassom.....	26
2.2	Medidor de Vazão Baseado em Tempo de Trânsito.....	27
2.3	Transdutores.....	39
2.4	Principais fabricantes na atualidade.....	42
3	DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL.....	45
3.1	Etapas do desenvolvimento.....	46
3.2	Medidor de referência.....	52
3.3	Estudo dos transdutores ultrassônicos.....	55
3.4	Desenvolvimento mecânico.....	61
3.5	Desenvolvimento eletrônico.....	64
3.6	Desenvolvimento da planta de testes.....	71
3.7	Testes e resultados.....	73
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	80
5	CONCLUSÕES.....	89
5.1	Trabalhos futuros.....	91
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	93
7	ANEXOS.....	96
7.1	Artigo Development and Signal Processing of Ultrasonic Flowmeters based on Transit Time.....	96

1 INTRODUÇÃO

A história da evolução das tecnologias tem uma íntima relação com a própria evolução humana, onde o objetivo final é ampliar as capacidades dos seres humanos, seja em força, velocidade, alcance ou percepção. A tecnologia aplicada no setor industrial possui características específicas e compatíveis com os mais diversos ambientes que nele estão inseridos. A instrumentação, uma vez inserida nesses ambientes, busca a medição e o controle de diversas variáveis fundamentais aos processos produtivos. Cada processo industrial possui uma graduação específica de importância para as variáveis que nele estão envolvidas. Podem-se citar diversas aplicações e suas variáveis de maior impacto, como por exemplo a vazão em uma tubulação hidráulica, o nível em um reservatório, a temperatura de um forno, entre diversas outras.

Até o ano de 2015, as principais variáveis dos processos industriais, e as mais comumente medidas e controladas, são: pressão, temperatura, vazão e nível. A vazão é uma variável com a qual o homem convive diariamente, seja no ambiente familiar ou profissional, sem dar-se conta de sua importância e abrangência. Ao monitorar o consumo de água em uma residência ou ao realizar um exame para verificar o fluxo sanguíneo de uma determinada artéria no corpo humano, realizam-se medições de vazão. Estes dois simples exemplos ilustram como para um mesmo conceito teórico básico sobre vazão são necessárias várias soluções para cobrir todas as possibilidades de aplicações [1].

Em ambientes industriais, considerada uma das grandezas mais importantes, a vazão é fundamental em aplicações como transferência de custódia, balanços de massas e controle de combustão, estando diretamente ligada à segurança, à qualidade do produto e à eficiente utilização de matérias-primas e demais compostos ao se produzir um determinado bem. Raros são os processos que não possuem uma tubulação por onde circula um líquido ou gás que seja, pelo menos, interessante ser monitorada. As mais variadas substâncias são transportadas e distribuídas em sistema de tubulações todos os dias. Alguns exemplos são: água potável, sucos de fruta, óleo e gás, fluidos de transferência de calor na indústria primária, bem como solventes, substâncias químicas ácidas ou básicas [2].

Historicamente, a necessidade de se medir vazão surgiu quando, depois de canalizar a água para o consumo doméstico, a administração pública descobriu uma fonte de arrecadação e estabeleceu taxas para o consumo do líquido. Segundo consta, as primeiras medições de água

teriam sido executadas por egípcios e romanos. Um texto do governador e engenheiro romano Julius Frontinus (30-103 d.C.) traz referências precisas a esse respeito [3].

Grandes nomes deram suas contribuições aos conceitos e teorias que envolvem o processo de medição de vazão. Em 1502 Leonardo da Vinci estava em Imola trabalhando como engenheiro-chefe para Cesare Borgia. Ele observou que a quantidade de água que escoava em um rio durante um determinado intervalo de tempo era a mesma em qualquer parte do rio, independente da largura, profundidade, inclinação e outros. Ele usou suas habilidades em cartografia para traçar o curso do rio, e em 1503 ele apresentou um plano para redirecionar o rio entre Imola, Florença e o mar [4]. Mas o desenvolvimento de dispositivos práticos aplicados na medição de vazão só foi possível com o surgimento da era industrial e o trabalho de pesquisadores como Bernoulli, Pitot e outros.

Com o surgimento e expansão de processos de produção em larga escala e crescimento da aplicação de processos contínuos na indústria, em substituição aos processos em batelada, houve um aumento nos cuidados relacionados com a medição de vazão, até a realidade em que os medidores de vazão muitas vezes possuem papel fundamental sobre a receita e a produtividade da empresa, principalmente nos setores de papel e celulose, alimentício, químico, água e esgoto, entre outros. Dessa forma, a medição de vazão tornou-se uma das tarefas mais importantes nesses e em outros processos.

No universo da geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, por exemplo, tem-se a medição de vazão como item de grande importância ao se analisar o desempenho de turbinas hidráulicas. A precisão na determinação do rendimento de turbinas hidráulicas é fundamental para o comissionamento desse equipamento. Valores de rendimento abaixo do esperado podem inviabilizar economicamente o empreendimento. Além disso, o conhecimento do rendimento em tempo real das máquinas hidráulicas permite a otimização dos despachos de energia elétrica pelos centros de operação do sistema. Enfim, a medição de vazão é utilizada na determinação do rendimento de turbinas hidráulicas.

A medição da vazão de fluidos é de interesse em diversas aplicações, tais como: na área de Energia Eólica a medição da velocidade do vento permite a construção de mapas eólicos e determinação ótima de locais para a instalação de parques eólicos; em túneis de vento para o estudo aerodinâmico de objetos de teste; no setor industrial para a determinação da vazão e perda de gases [5], entre outros. Os instrumentos para a medição da velocidade do fluido são diversos, entretanto, quando as restrições do projeto apontam a uma medição com suficiente exatidão os instrumentos baseados em sensores ultrassônicos se destacam. Estes apresentam

características de baixa incerteza comparadas com os instrumentos que usam as técnicas convencionais, assim como menor tempo de resposta e manutenção mínima [6].

Medir a vazão de líquidos, gases, vapores ou sólidos é importante tanto para processos industriais dinâmicos quanto para leituras ocasionais. Em alguns processos, a imprecisão da vazão pode fazer a diferença entre ganhos e perdas. Em outros casos, a medida de vazão incorreta ou errada pode acarretar sérias, ou mesmo desastrosas, consequências [7]. Por exemplo, uma medição incorreta de vazão pode comprometer a qualidade de um produto e, conseqüentemente, um prejuízo financeiro ou, até mesmo elevar a pressão de uma linha ao ponto, extremo, de provocar um rompimento que pode trazer, além dos prejuízos financeiros, danos e perdas humanas.

A medição de vazão inclui no seu sentido mais amplo, a determinação da quantidade de líquidos, gases e sólidos que passa por um determinado local na unidade de tempo. A quantidade total movimentada pode ser medida em unidades de volume (litros, mm^3 , cm^3 , m^3 , galões, pés cúbicos) ou em unidades de massa (g, kg, toneladas, libras).

A vazão instantânea é dada pela divisão de uma das unidades anteriores, por uma unidade de tempo (litros/min, m^3/h , galões/min). No caso de gases e vapores, a vazão instantânea pode ser expressa, em kg/h ou m^3/h . Quando a vazão é medida em unidades de volume, devem ser especificadas as “condições base” consideradas. Assim, no caso de líquidos, é importante indicar que a vazão se considera “nas condições de operação”, ou a $0\text{ }^\circ\text{C}$, $20\text{ }^\circ\text{C}$, ou a outra temperatura qualquer. Na medição de gases, é comum indicar a vazão em Nm^3/h (metros cúbicos normais por hora, ou seja, a temperatura de $0\text{ }^\circ\text{C}$ e a pressão atmosférica) ou em SCFM (pés cúbicos padrão por minuto – temperatura $60\text{ }^\circ\text{F}$ e 14.696 psi de pressão atmosférica).

Dentro de tubulações, as vazões de fluidos mostram propriedades completamente diferentes, conseqüentemente, há diferentes princípios para suas medições.

As técnicas utilizadas para medição de vazão são muitas, cada uma com características e princípios de funcionamento específicos para cada aplicação. Devido ao elevado número de tipos de processos e produtos, haverá sempre um medidor mais indicado para uma determinada aplicação e a escolha certa será fundamental para o sucesso da medição. A correta escolha de um determinado instrumento para medição de vazão depende de vários fatores, como, por exemplo, exatidão desejada, tipo de produto e suas características (líquido, mássico ou gasoso, limpo ou sujo, fases, condutividade elétrica, transparência, entre outros), condições termodinâmicas, espaço físico e custo, entre outros.

Os medidores de vazão ultrassônicos utilizam uma das tecnologias que mais crescem no campo geral de instrumentos para monitoramento, controle e medição de processos. Em virtude das vantagens da medição de vazão não intrusiva, fácil instalação, baixa manutenção e alta precisão de medição, o medidor de vazão ultrassônico tem conquistado cada vez mais aplicações na área de produção da indústria moderna. Basicamente, existem dois princípios aplicáveis: método tempo de trânsito e método Doppler. O medidor de vazão baseado em efeito Doppler possuem maior erro e não são aplicáveis para medição de vazão de fluidos limpos e homogêneos, pois dependem da reflexão do sinal ultrassônico. O medidor de vazão baseado no tempo de trânsito de sinais ultrassônicos é um dos métodos que se destaca entre os demais em função de sua alta precisão, queda de pressão quase zero e ampla faixa dinâmica [8]. Esse é o modelo abordado nesse estudo.

Algumas vantagens desse medidor são:

- Não provoca obstrução a vazão ou apresenta partes móveis;
- Não provoca queda de pressão;
- Não sofre efeito das características químicas do fluido;
- Apresenta relação linear entre o tempo de trânsito e a vazão;
- Permite a medição da vazão nos dois sentidos;
- Não sofre efeito pela temperatura, densidade ou concentração do fluido;
- Pode ser instalado em tubulação existente, quando utilizado o método não invasivo, porém, neste caso, é necessário realizar a calibração em campo.

Porém, esse medidor também apresenta limitações. Algumas delas são:

- Apresenta problemas em aplicações específicas com líquidos e gases;
- É interessante haver um trecho considerável para trânsito do pulso ultrassônico. Portanto, é indicado para tubulações com diâmetros que facilitem a medição dos sinais;
- Pode sofrer influência de ruídos sônicos;
- Indicado para fluidos livres de impurezas;
- Não indicado para fluidos contaminados;
- Partículas sólidas e bolhas de ar causam erro.

O método do medidor de vazão baseado em tempo de trânsito de sinais ultrassônicos baseia-se na teoria de que quando o pulso ultrassônico se propaga através do meio que flui, seu

tempo de propagação variará com a velocidade de fluxo do meio líquido. Por conseguinte, é crucial medir com precisão a diferença entre os tempos necessários para os pulsos se deslocarem a montante e a jusante na vazão. A escolha das tecnologias mecânica e eletrônica aplicadas na solução tem fundamental responsabilidade no resultado final dos testes.

A possibilidade de realizar-se um estudo experimental sobre uma tecnologia atualmente utilizada por grandes fabricantes e, ao mesmo tempo, objeto de estudo de vários pesquisadores motiva de forma especial esse estudo. Espera-se que todo o conhecimento publicado seja útil para novos estudos e fonte de inspiração para outros pesquisadores.

Na resolução dos problemas de engenharia, conta-se com dois métodos distintos, o teórico e o experimental. Alguns problemas necessitam dos dois métodos para serem resolvidos. A teoria e o experimento são dois métodos complementares, daí a pesquisa embasada em ambos apresentará resultados mais concisos e confiáveis.

No método teórico, os resultados são normalmente de uso geral. É muito comum o uso de hipóteses simplificadoras, em alguns casos o método teórico resulta em problemas matemáticos complexos, não requer o uso de equipamentos de laboratório, apenas lápis, papel, calculadoras e computadores. Muitas vezes o tempo requerido para a solução do problema é menor, já que não é necessário construir modelos em escala ou dispositivos experimentais e realizar medições. Já no método Experimental, quase sempre os resultados aplicam-se somente ao sistema que está sendo testado, requer a construção de um protótipo e o tempo requerido para a solução do problema é normalmente longo por envolver o projeto, construção e depuração do dispositivo experimental.

Esta dissertação utiliza o método Experimental e está dividida da seguinte maneira: Introdução (capítulo 1) apresentando motivação, importância, abrangência e contextualização do objeto de pesquisa; Revisão Bibliográfica (capítulo 2) com um resumo das principais técnicas utilizadas para medição de vazão através de ultrassom e suas principais características; Desenvolvimento Experimental (capítulo 3) com a idealização da metodologia experimental utilizada e com o trabalho prático elaborado; Análise dos Resultados (capítulo 4) com as informações obtidas através da experimentação prática; Conclusões (capítulo 5) com a análise dos resultados obtidos; Referências Bibliográficas (capítulo 6) com a relação das fontes estudadas para realização do trabalho; e o artigo publicado como anexo (capítulo 7).

Fruto dessa dissertação, o artigo intitulado *“Development and Signal Processing of Ultrasonic Flowmeters based on Transit Time”* foi desenvolvido e aceito para a Induscon 2016 - *12th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications*. O referido artigo foi

apresentado em Novembro de 2016 na Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), na cidade de Curitiba, Paraná. O artigo, na íntegra, está no anexo I dessa dissertação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Entre as diversas técnicas para medição de vazão, algumas merecem destaque, a fim de justificar esse estudo e suas referências.

O Tubo de Pitot tem diversas áreas de atuação, na marinha, aeronáutica, na engenharia em praticamente em todas as áreas que envolvem fluídos com um erro de aproximadamente 1 %. Ele obtém a velocidade de uma dada corrente de um escoamento a partir da medição de duas pressões: estática e de estagnação [9]. A diferença entre essas duas pressões é chamada de pressão dinâmica.

O medidor Venturi clássico, ou de Herschel, é pouco usado, pois é muito grande tornando-o inconveniente para instalações industriais além de ser caro para fabricação. Uma facilidade é que os medidores de Venturi são auto-limpantes devido a sua superfície interna ser lisa [10]. São medidores com o melhor desempenho entre os seus similares, na categoria de medidores de obstrução, e provocam a menor perda de pressão permanente na medida, portanto os menos intrusivos.

O Tubo de Dall é uma versão encurtada do tubo de Venturi, com um perfil especial que requer um comprimento de tubo reto bem menor e proporciona uma diferença de pressão relativamente maior com menor perda de pressão. Esse tipo de medidor é muito usado para medir vazão em tubulações longas. Entretanto, a medida é sensível ao valor do número de Reynolds para a vazão, o que é um grande inconveniente. Não é aplicável para fluidos contendo sólidos [11].

O Annubar é um medidor do tipo indireto que utiliza fenômenos relacionados com a quantidade de fluido passante, onde há queda de pressão. As causas da queda de pressão são: atrito entre o fluido e a parede interna do tubo, mudança de pressão e velocidade devido a uma curva ou um obstáculo, entre outras [11].

A Placa de Orifício é o elemento primário de vazão do tipo restrição mais usado. Ela é aplicada na medição de vazão de líquidos limpos e de baixa viscosidade, da maioria dos gases e do vapor d'água em baixa velocidade. Embora simples, a placa de orifício é um elemento de precisão satisfatória. A Placa de Orifício é uma placa fina que pode ser interposta entre flanges de tubos. Como sua geometria é simples, é de baixo custo e fácil instalação e reposição [11].

Os Rotâmetros são medidores de vazão de área variável, nos quais o fluido (líquido, gás ou vapor) escoar em um tubo cônico, vertical, de baixo para cima, no qual há um flutuador. Como o peso do flutuador é constante, o aumento da vazão requer um aumento de área livre de

escoamento, uma vez que a perda de pressão do flutuador permanece constante. Desta forma, a posição de equilíbrio do flutuador indica a vazão. Estes medidores são amplamente utilizados em processos industriais, onde há necessidade de observação instantânea da vazão. São muito adequados para baixas vazões, onde apresentam uma excelente relação entre desempenho e custo. Não são afetados por variações do perfil e velocidade na entrada, não necessitando, portanto, de trechos retos à montante. [12]

O medidor de deslocamento positivo com Disco Nutante, conhecido como Medidor de Disco, é usado extensivamente para o serviço de medição de água residencial. O líquido entra no medidor através da conexão de entrada, passa por um filtro, indo ao topo da carcaça principal. O fluido se movimenta para baixo, através da câmara de medição, indo até a base do medidor e daí a conexão da saída do medidor [11].

O medidor de Engrenagens Ovais pertence à classe dos medidores de deslocamento positivo, com extração da energia do processo, intrusivo e com saída linear em relação à vazão. O medidor possui uma câmara de medição com duas engrenagens ovais acopladas entre si e girando em sentidos contrários [11].

O medidor de lóbulos rotativos, ou medidor do tipo Roots, consiste de dois rotores em formato de "oito" montados dentro de uma carcaça e que giram em sentidos opostos. Os rotores são impelidos na direção mostrada pelo gás escoando e de tal modo que a cada ciclo de rotação um volume calibrado de gás é deslocado através do medidor. O escoamento é totalizado por meio da soma do número de ciclos do rotor. Os medidores do tipo Roots podem ser utilizados em pressões de até 80 bar ou mais, e sob temperaturas de operação de até 600 °C [11].

Medidores tipo Hélice são usados em irrigação ou medição de águas residuais em municípios. Embora em alguns projetos medidores Hélice e Turbina sejam quase idênticos e operem com o mesmo princípio de rotor axial. Este tipo de medidor de vazão é atualmente comercializado e se destaca como uma categoria distinta de turbina axial. [13]

O medidor de vazão tipo Turbina deve o seu nome à turbina que está posicionada na linha de escoamento. A velocidade da substância a ser medida faz com que a turbina gire a uma velocidade que, com um mínimo de fricção, é proporcional à velocidade e, assim, para a vazão do fluido. [1]

O medidor de vazão Eletromagnético é, com certeza, um dos medidores mais flexíveis e universais dentre os métodos de medição de vazão. Sua perda de pressão é equivalente a perda de um trecho reto de tubulação, já que não possui qualquer obstrução. É insensível à densidade e à viscosidade do fluido de medição. São ideais para medição de produtos químicos altamente

corrosivos, fluidos com sólidos em suspensão, lama, água, polpa de papel. Sua aplicação estende-se desde saneamento até indústrias químicas, papel e celulose, mineração e indústrias alimentícias. A única restrição, em princípio, é que o fluido tem que ser eletricamente condutivo. Tem ainda como limitação o fato de fluidos com propriedades magnéticas adicionarem certo erro de medição [13]. As leis físicas desse princípio de medição podem ser atribuídas ao físico britânico Michael Faraday, que em 1831 descobriu que a corrente elétrica pode ser gerada por um campo magnético: *“Quando um condutor se move dentro de um campo magnético, é produzida uma força eletromotriz (f.e.m.) proporcional a sua velocidade.”*

O medidor de vazão Vortex usa o fenômeno da formação de vórtices, que ocorre quando um fluido (vapor, gás ou líquido) flui ao longo de um objeto irregular, que é chamado de anteparo. Esse anteparo promove a criação de vórtices (redemoinhos) alternados com frequência compatível com a vazão do fluido [1].

O medidor Parshall, desenvolvido pelo engenheiro Ralph L. Parshall, na década de 1920 nos Estados Unidos, é uma melhoria realizada no projeto de Calha Venturi. Desenvolvido inicialmente para aplicações em irrigação, hoje em dia é utilizado frequentemente nas aplicações industriais e de saneamento [11].

Outro método utilizado para medição de vazão é baseado no princípio Coriolis, que permite medir diretamente a vazão da massa. É um instrumento que possui grande aplicabilidade nas indústrias alimentícia, farmacêutica, química, papel e petróleo. Sua medição independe das variáveis de processo, como densidade, viscosidade, condutibilidade, pressão, temperatura e perfil do fluido [13].

Além de todos os exemplos citados nessa introdução, aqui apresentados os principais, há no mercado mais um grande número de alternativas para medição de vazão. Esse trabalho terá como foco o medidor ultrassônico de vazão baseado em tempo de trânsito, pois essa técnica tem conquistado a atenção de vários fabricantes e usuários por possibilitar seu uso nos mais diversos fluidos, condutivos ou não.

Por muitos anos, os medidores que utilizam pressão diferencial foram os dispositivos de medição de vazão mais utilizados para medição de vazão de fluido em tubos e canais abertos que requerem uma medição precisa a um custo razoável. Em mercados como hidráulica, abastecimento de água e irrigação, no entanto, a vazão deve ser medida sem quaisquer perdas de carga ou qualquer queda de pressão. Isso significa que não podem haver partes móveis, nem dispositivos secundários, nem existirem quaisquer restrições. Existem dois tipos de medidores

de vazão atualmente que cumprem este requisito: medidores de vazão eletromagnéticos e ultrassônicos.

Considerando medidores de vazão ultrassônicos, podem ser aplicados em praticamente qualquer tipo de líquido, enquanto os eletromagnéticos requerem um mínimo de condutividade elétrica do líquido para a operação. Além disso, o custo dos medidores de vazão ultrassônicos é quase independente do diâmetro do tubo, enquanto o preço dos eletromagnéticos aumenta drasticamente com o diâmetro do tubo. [13]

Os medidores de vazão por pressão diferencial como placa orifício, bocal e tubo Venturi são usados para medições de vazão em tubulações industriais sob os pontos de vista do baixo custo e de padrões globais. No entanto, estes métodos apresentam erros de medição que são causados por alterações nas condições da vazão devido a fenômenos de envelhecimento; por exemplo: desgaste da superfície, corrosão e deposição de metal dentro dos tubos. Para lidar com essas dificuldades, os medidores de vazão baseados em tempo de trânsito (*time-of-flight*) e escoamento transversal (*cross-flow*), que podem ser colocados na parte externa da tubulação, estão sendo utilizados em usinas de energia nuclear nos Estados Unidos.

Existem vários tipos de medidores de vazão ultrassônicos disponíveis no mercado. Cada um com seus pontos atrativos e que merecem atenção. Os principais princípios utilizados são [13]:

Tempo de Trânsito: esta tem sido a tecnologia “estado da arte”, sendo o tipo mais utilizado nos novos produtos disponibilizados no mercado e será objeto de estudo para os objetivos desse trabalho. Este tipo de medidor de vazão ultrassônico utiliza a diferença de tempo para um impulso ultrassônico percorrer uma distância fixa, em um primeiro momento contra o fluxo e, em seguida, no sentido do fluxo. Medidores de vazão baseados em tempo de trânsito são sensíveis a sólidos em suspensão ou bolhas de ar no fluido.

Doppler: esta é a técnica mais antiga, descoberta em 1842 por Christiaan Doppler. Este tipo é mais popular e menos dispendioso, mas não é considerado tão preciso como o medidor de tempo de trânsito. Ele faz uso do desvio de frequência promovido pelo efeito Doppler causado por som refletido ou disperso a partir de suspensões no percurso de escoamento e é, portanto, mais complementar do que competitivo aos medidores de tempo de trânsito.

Correlação cruzada: duas secções de medição são instaladas com uma certa distância uma da outra. Ambas medem a absorção de energia do sinal ultrassônico. A correlação cruzada calcula a velocidade de escoamento.

Mudança de fase: a diferença de fase do sinal de transmissão e recepção é medida no sentido da vazão e contra ela. O ângulo de desvio de fase resultante é diretamente proporcional à velocidade do fluido.

Desvio: o desvio de um sinal ultrassônico ao atravessar uma dada vazão é medido pela atenuação do sinal. Não foi encontrado modelo comercial entre os fabricantes identificados no mercado que utilize essa técnica.

O medidor de vazão baseado em tempo de trânsito é o mais preciso entre os ultrassônicos e está disponível em versões intrusivas, onde o transdutor é classificado “molhado” por estar em contato com o fluido a ser monitorado, para medição de líquidos e gases, e não intrusivas, sem o contato com o fluido, apenas para líquidos. A incerteza de medição está entre 5 %, para o pior caso, e 1 %, para o melhor caso [13].

O medidor baseado no efeito Doppler é um dispositivo muito diferente, e por isso pode ser injusto chamá-lo de um medidor de vazão. O seu desempenho é muito sensível à instalação e seu nome foi divulgado a tal ponto que muitos usuários assumem que, quando um medidor de vazão ultrassônico é citado, trata-se sempre de um destes. A incerteza de medição dificilmente será melhor do que cerca de ± 2 %, e na pior das hipóteses, é indeterminada. Mesmo sendo inferior na maior parte das características, possui um mercado muito importante em algumas aplicações de vazão de líquidos em que existe um segundo componente adequado para fornecer a reflexão do feixe [13].

O medidor de vazão baseado em correlação cruzada apresenta precisão razoável (entre os dois princípios anteriores), aplicável para vazões de líquidos monofásicos ou polifásicos, mesmo para casos turbulentos. Quando equiparado em características de aplicação, possui custo acima dos demais [13].

É importante não confundir o medidor baseado em tempo de trânsito com o medidor Doppler e lembrar que o medidor ultrassônico baseado em tempo de trânsito é um instrumento muito mais preciso do que o medidor Doppler e deve ser considerado seriamente em uma ampla gama de aplicações, especialmente envolvendo líquidos sem propriedades condutivas ou gases [13].

Os medidores ultrassônicos, em sua essência, utilizam os tempos necessários para que as ondas sonoras emitidas concluam um percurso previamente determinado e compatível com as dimensões do meio onde se realiza a medida. No caso do medidor de vazão baseado em tempo de trânsito, foco desse trabalho, utiliza-se os tempos de trânsito de ondas sonoras emitidas entre dois transdutores, com distância entre eles conhecida, para, assim, calcular a velocidade média do escoamento entre os dois. A diferença entre os tempos de trânsito observada no sistema indicará o sentido e a intensidade da vazão [13].

Destaca-se, ainda, a presença de sensores ultrassônicos em medidores de vazão não ultrassônicos, como é o caso do medidor Vortex. No medidor Vortex pode-se encontrar um sensor ultrassônico realizando a medição dos vórtices para determinação da vazão [13].

Sensores de vazão ultrassônicos têm sido cada vez mais requisitados e preferidos em processos industriais que demandam precisão e confiabilidade nos resultados [13].

2.1 A Onda Sonora

As ondas sonoras são ondas mecânicas que consistem na oscilação de partículas atômicas ou moleculares de uma substância em torno da sua posição de equilíbrio. Dependendo da frequência dessa oscilação, o som pode ser classificado como sendo infrassom, som audível e ultrassom. Essa classificação é feita com base na capacidade auditiva do ser humano, que compreende uma faixa de frequências na ordem de 20 a 20.000 Hz. A Figura 1 ilustra o espectro de frequências [14].

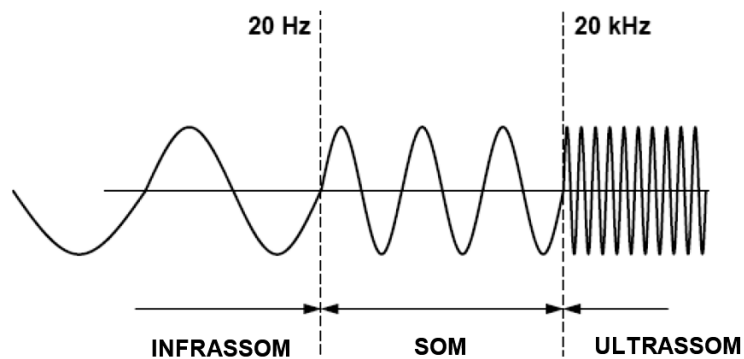


Figura 1 – Espectro de Frequências Sonoras [14].

As principais características físicas das ondas sonoras são comprimento de onda, frequência, período, amplitude e velocidade [14].

Comprimento de onda (λ): para as ondas transversais, corresponde à distância entre duas “cristas” ou dois “vales” sucessivos; para ondas longitudinais, corresponde à distância entre duas zonas de compressão e rarefação sucessivas.

Período (T): corresponde ao tempo necessário para uma onda percorrer a distância de um comprimento de onda, λ .

Frequência (f): corresponde ao número de vibrações completas produzidas durante o tempo de um segundo. A medida é feita em Hertz (Hz), que significa “um ciclo por segundo” e corresponde ao inverso do período, conforme equação 1.

$$f = \frac{1}{T} \quad (1)$$

Amplitude (A): corresponde à intensidade da onda sonora proporcional à deflexão máxima das partículas do meio de transmissão. Esta característica determina a intensidade da onda sonora, ou seja, a energia.

Velocidade da onda sonora (c): corresponde à distância percorrida pela onda por unidade de tempo, sendo constante para cada meio e dependente das propriedades desse meio, como elasticidade, temperatura e densidade. A elasticidade fornece as forças restauradoras às regiões deslocadas e a densidade, à inércia do sistema. Quanto mais próximas estiverem as moléculas, maior será a velocidade de propagação do som no meio [15]. De modo aproximado, a velocidade do som no ar é igual a 340 m/s, nos líquidos é igual a 1.400 m/s e nos sólidos 5.000 m/s. Os meios a serem utilizados para cálculos precisos serão apresentados a seguir.

O comprimento de onda, λ , depende da velocidade do som, c , no meio e da frequência, f , utilizada. A equação 2 apresenta a velocidade do som em função da frequência e do comprimento de onda [14].

$$c = f \cdot \lambda \quad (2)$$

Quanto maior a frequência, menor o comprimento de onda, mais estreito é o feixe transmitido. Um feixe estreito é preferível porque é menos provável que cause reflexos parasitas e o seu caminho será melhor definido. Para uma velocidade do som na água de 1.414 m/s, uma frequência de 400 kHz irá resultar num comprimento de onda com aproximadamente 3,5 mm. Enquanto que 1 MHz irá resultar em aproximadamente 1,4 mm. Para uma velocidade do som

no ar de 343 m/s, uma frequência de 40 kHz irá resultar num comprimento de onda com aproximadamente 8 mm, enquanto que 100 kHz irá resultar em aproximadamente 3,4 mm.

Assim, para o ar com $\lambda = 2a$, onde a é uma referência para comparação, o diâmetro do cristal piezoelétrico para obter a distribuição do meio na Figura 2, a 40 kHz, será de, aproximadamente, 8 mm, ao passo que os diâmetros de cristais para aplicações na água são susceptíveis de utilizar $k < a$ e resultar em um feixe estreito intenso. A Figura 2 apresenta a variação da intensidade irradiada por um transdutor [16].

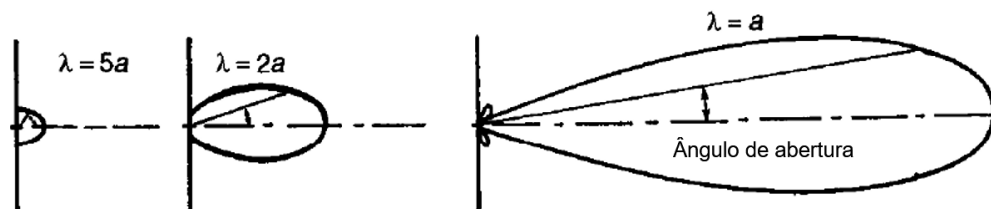


Figura 2 – Variação de intensidade irradiada por um transdutor [16].

As ondas ultrassônicas são geradas por transdutores ultrassônicos, também chamados simplesmente de transdutores. De um modo geral, um transdutor é um dispositivo que converte um tipo de energia em outro. Os transdutores ultrassônicos convertem energia elétrica em energia mecânica e vice-versa. Esses transdutores são feitos de materiais que apresentam um fenômeno chamado efeito piezoelétrico [16].

O efeito piezoelétrico foi descoberto pelos irmãos Pierre e Jacques Curie em 1880 e consiste na variação das dimensões físicas de certos materiais sujeitos a campos elétricos. O contrário também ocorre, ou seja, a aplicação de pressões. Por exemplo, pressões acústicas que causam variações nas dimensões de materiais piezoelétricos provocam o aparecimento de campos elétricos neles. Outro método para gerar movimentos ultrassônicos é a passagem de eletricidade sobre metais especiais, criando vibrações e produzindo calor intenso durante o uso. Este efeito é chamado de magnetoestritivo [16].

Ao se colocar um material piezoelétrico num campo elétrico, as cargas elétricas da rede cristalina interagem com o mesmo e produzem tensões mecânicas. Transdutores piezoelétricos empregam cristais ou cerâmicas que vibram quando uma tensão elétrica alternada é aplicada a seus terminais. O quartzo e a turmalina, cristais naturais, são piezoelétricos [16].





O cristal, para ser usado como transdutor, deve ser cortado de forma que um campo elétrico alternado, quando nele aplicado, produza variações em sua espessura. Dessa variação resulta um movimento nas faces do cristal, originando as ondas sonoras. Cada transdutor possui

uma frequência de ressonância natural, tal que quanto menor a espessura do cristal, maior será a sua frequência de vibração [16].

Como o efeito piezoelétrico é reversível, as ondas de som incidindo em tais elementos piezoelétricos produzirão sinais elétricos em seus terminais. Ou seja, o mesmo transdutor que emite o sinal ultrassônico pode funcionar como receptor, pois os ecos que voltam a ele produzem vibração no cristal, fazendo variar suas dimensões físicas que, por sua vez, acarretam a formação de um campo elétrico. Esse campo gera sinais que podem ser amplificados, mostrados e utilizados em diversas aplicações [16].

Quanto à relação entre a direção da perturbação e propagação, existem basicamente dois tipos de movimento da onda: transversal ou de cisalhamento, e longitudinal ou compressional, representados na Tabela 1. Nas ondas transversais o distúrbio é perpendicular à direção de propagação da onda. Como exemplo de ondas transversais pode-se citar aquelas que se propagam na superfície da água. Nas ondas longitudinais a vibração das partículas está na mesma direção de propagação da onda. Como exemplos das ondas longitudinais existem as ondas sonoras e ultrassônicas, frequentemente chamadas de ondas de compressão [17].

Tabela 1 – Representação da velocidade das partículas e direção de propagação das ondas [17].

Parâmetro	Ondas transversais ou de cisalhamento	Ondas longitudinais ou compressionais
Movimentação das partículas		
Direção de propagação das ondas		

As ondas ultrassônicas podem ser representadas através da equação unidimensional da onda para a variável pressão p , apresentada pela equação 3 [18]:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial z^2} - \rho \cdot K \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 \quad (3)$$

Onde:

z representa o eixo longitudinal de propagação do distúrbio mecânico;

p é a pressão ao longo do eixo z ;

ρ é a densidade média do material sem perturbação (uma constante);

K é a constante de compressibilidade adiabática do material;

t representa a unidade de tempo.

A descrição simplificada de algumas das possíveis soluções da equação da onda unidimensional para a variável pressão p , está mostrada de forma resumida na Tabela 2 e é utilizada para a apresentação dos principais conceitos das ondas sonoras e ultrassônicas [18].

Tabela 2 – Soluções da equação da onda unidimensional [18].

Soluções	Comentários
$p = p_+ \cdot \cos(\omega \cdot t - k \cdot z)$	Onda viajando na direção $+z$
$p = p_- \cdot \cos(\omega \cdot t - k \cdot z)$	Onda viajando na direção $-z$
$p = p_+ \cdot \sin(\omega \cdot t - k \cdot z)$	Onda deslocada $\frac{\pi}{2}$ radianos
$p = p_+ \cdot \cos(\omega \cdot t - k \cdot z + \phi)$	Onda com fase arbitrária
$p = p_{\mp} f(\omega \cdot t \pm k \cdot z)$	Qualquer função (f) de $\omega \cdot t \pm k \cdot z$

Onde:

p_+ e p_- são as amplitudes de pressão (constantes);

ω é a frequência angular da onda em radianos por segundo (rad/s);

k é a constante de propagação que representa o número de onda.

As características de tempo e espaço da onda podem ser representadas através da equação 4, que representa a magnitude da pressão em função da distância longitudinal z , no instante de tempo $t = 0$ [18].

$$p = p_+ \cdot \cos(\omega \cdot t - k \cdot z) \quad (4)$$

A Figura 3(a) mostra o formato da onda de pressão representada pela equação 4.

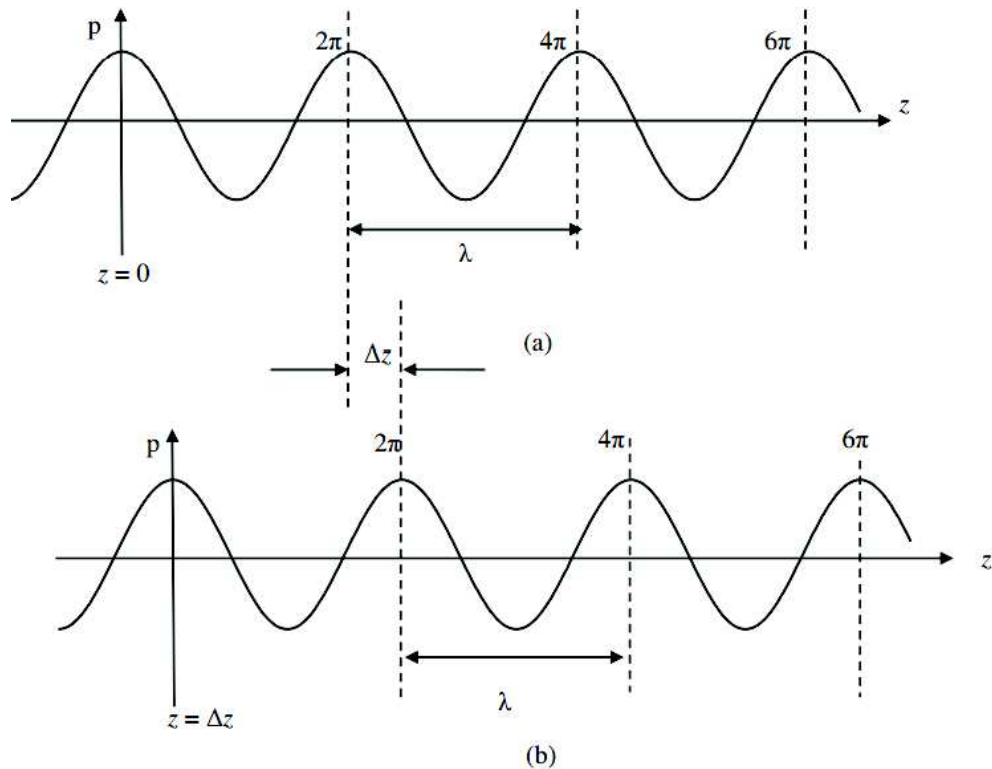


Figura 3 – Ondas de pressão em função da distância z ; (a) em $t = 0$; (b) em $t = \Delta t$ [18].

Considerando que a fase é $\omega \cdot t - k \cdot z$, e t é fixo nesta análise, uma mudança de 2π na fase é alcançada quando kz aumenta 2π radianos. Para isto, é necessária uma mudança de $2\pi/k$ na distância z , e este espaço de repetição é conhecido como comprimento de onda λ da onda e está representado pela equação 5 [18]:

$$\lambda = \frac{2 \cdot \pi}{k} \quad (5)$$

Agora, considerando a Figura 3(b) na qual o tempo é avançado por Δt , as posições dos picos da onda (iguais ou múltiplos de $2 \cdot \pi$), representadas pelas linhas tracejadas, foram avançados de Δz [18].

Através da Figura 3 (a e b) é possível calcular a velocidade da onda, considerando o termo $(\omega \cdot t - k \cdot z)$ sempre igual a zero. Quando $t = 0$, a posição inicial da onda é em $z = 0$ [18].

Quando $t = \Delta t$, a posição inicial da onda é em $z = \Delta z$, resultando na equação 6 [18].

$$\omega \cdot \Delta t - k \cdot \Delta z = 0 \therefore$$

$$\frac{\Delta z}{\Delta t} = \frac{\omega}{k} \quad (6)$$

O resultado da equação 6 resulta na velocidade da onda, conhecida como velocidade de fase longitudinal c da onda, conforme equação 7 [18].

$$c = \frac{\omega}{k} \quad (7)$$

A Figura 3 não apresenta somente a solução da onda com comportamento senoidal como uma função da distância z , mas também com uma função do tempo t . Com isso, a frequência temporal da oscilação senoidal é apresentada na equação 8 [18].

$$f = \frac{\omega}{2 \cdot \pi} \quad (8)$$

Combinando as Equações 5, 7 e 8, a equação 9 representa a comprimento de onda λ relacionando velocidade e frequência [19], comprovando o que foi citado anteriormente na equação 2 [18].

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (9)$$

Quando o ultrassom atravessa uma interface entre dois fluidos diferentes, ou entre um líquido e um sólido, esta será ao mesmo tempo uma interface de transmissão e de reflexão. A transmissão será maior quanto mais próximas forem as velocidades de propagação nos dois meios. Assim, fica evidente a difícil missão de transmitir um sinal ultrassônico a partir do ar, através do metal, percorrer um fluido e, em seguida, para um transdutor. Por outro lado, é possível transmitir a partir de líquido, através de um sólido, e, em seguida, para um transdutor. A característica do material a ser considerada para essa análise é a impedância [18].

A impedância do meio, Z , pode ser calculada levando em consideração a densidade ρ do meio e a velocidade de propagação do ultrassom c nesse meio. A equação 10 apresenta a relação entre a impedância, a densidade do meio e a velocidade de propagação do som [18].

$$Z = \rho \cdot c \quad (10)$$

Considerando a equação 11 e isolando a densidade do meio ρ , a equação da impedância acústica característica pode ser reescrita na forma da equação 12, mostrando a relação entre a pressão aplicada p e a velocidade da partícula v [18].

$$p = \rho \cdot c \cdot v \quad (11)$$

$$Z = \frac{p}{v} \quad (12)$$

Utilizando valores aproximados de ρ para a temperatura de 20 °C, pode-se calcular as impedâncias dos principais meios de propagação do ultrassom.

Para o ar:

$$Z = 1,19 \cdot 343 = 408 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$$

Para a água:

$$Z = 1000 \cdot 1414 = 1,41 \cdot 10^6 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$$

Para o aço:

$$Z = 8000 \cdot 5625 = 45 \cdot 10^6 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$$

A proporção das potências do ultrassom transmitida, P_T , e refletida, P_R , são apresentadas como sendo as equações 13 e 14 [16].

$$P_T = \frac{4 \cdot Z_1 \cdot Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad (13)$$

$$P_R = \frac{(Z_1 - Z_2)^2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad (14)$$

Onde:

Z_1 e Z_2 são as impedâncias dos meios 1 e 2, respectivamente.

Assim, enquanto que a transmissão a partir do aço para a água, e vice-versa, é aproximadamente 12 %, a transmissão entre o ar e o aço é desprezível, aproximadamente 0,0036 % [16].

Por essa razão, nas aplicações para medição de vazão de gases, o transdutor precisa ser sempre “molhado”, ou seja, deve estar sempre em contato com o gás para eliminar a interface entre o ar e o aço [16].

Quando uma onda atravessa um meio, as partículas do meio começam a vibrar e adquirir energia cinética. A energia fornecida pelas ondas ultrassônicas ao atravessar o meio é medida pela intensidade acústica da onda. A intensidade I é expressa em W/cm^2 ou W/m^2 e representada através das seguintes relações que resultam na equação 15 [16].

$$I = \frac{p}{a} = \frac{W}{a \cdot t} = \frac{F \cdot d}{a \cdot t} = p \cdot v \quad (15)$$

Onde:

p é a pressão;

a é a área;

W é o trabalho;

t é o tempo;

F é a força;

d é a distância;

v é a velocidade.

Substituindo a equação 12 na 15, são obtidas as equações que relacionam intensidade acústica com impedância do meio [18]. A equação 16 apresenta Intensidade acústica da onda em função da impedância e da pressão, enquanto a equação 17 apresenta a intensidade acústica da onda em função da impedância e da velocidade [16].

$$I = \frac{p^2}{Z} \quad (16)$$

$$I = Z \cdot v^2 \quad (17)$$

2.1.1 Tipos de Ondas Sonoras

Os principais tipos de ondas utilizados nos medidores de diversas grandezas e características são os de volume e os de superfície. As ondas de volume, transversais e longitudinais, constituem os tipos fundamentais. Derivadas dessas fundamentais, surgem as ondas de superfície, Rayleigh, Lamb e Love, que se destacam na análise sônica [17].

Na aplicação para medição de vazão, a característica fundamental do tipo de onda utilizada é a capacidade de se propagar em sólidos, líquidos e gases [17].

As ondas transversais ou de cisalhamento são o tipo de onda na qual a vibração das partículas ocorre na direção perpendicular ao de propagação, conforme mostrado na Figura 4.

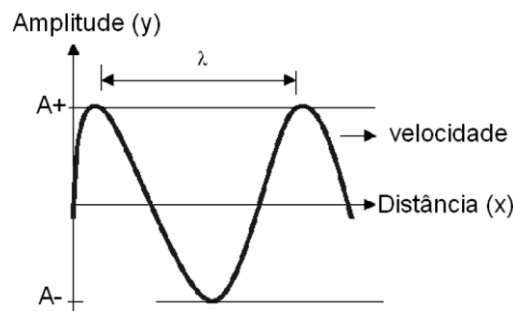


Figura 4 – Ondas transversais [17].

As ondas transversais são praticamente incapazes de se propagarem em líquidos e gases em função das características das ligações entre as partículas. Sua aplicação se restringe a análise de sólidos. Outra característica marcante é que sua velocidade de propagação é aproximadamente a metade da velocidade da onda longitudinal [17].

As ondas longitudinais ou de compressão são ondas cujas partículas do meio em que se propagam vibram na mesma direção de propagação da onda nesse meio, conforme mostrado na Figura 5.

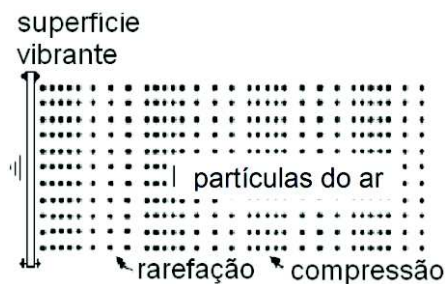


Figura 5 – Ondas longitudinais [17].

As ondas longitudinais propagam-se nos sólidos, líquidos e gases. Devido ao seu modo de propagação, trabalham com maior velocidade. Esse é o tipo de onda utilizado por transdutores ultrassônicos no processo de medição de vazão [17].

Uma característica que deve ser considerada é o fato de o tipo de onda poder ser alterado conforme o ângulo de incidência no meio, podendo passar de uma onda puramente longitudinal para uma puramente transversal ou mista [17].

A energia fornecida pelas ondas ao atravessar o meio é medida pela intensidade acústica ou intensidade sonora. Essa energia pode ser definida como sendo a razão média do fluxo de energia que atravessa uma unidade de área pela unidade de tempo, sendo indicada em Watts/cm². Ao se propagar em um meio, a onda ultrassônica tem sua intensidade reduzida em função da distância provocada pelo mecanismo de atenuação. Na prática, mede-se a atenuação total proveniente de diferentes mecanismos envolvidos. Esses mecanismos podem ser a absorção, o espalhamento, a reflexão, a refração e a difração. O processo de absorção converte a energia ultrassônica em outra forma de energia, por exemplo, térmica. Os processos de reflexão, refração, difração e espalhamento promovem o desvio da onda, ou parte dela, para viajar em direções diferentes da direção original, enfraquecendo a onda que continua se propagando conforme planejamento inicial [17].

2.1.2 Velocidade do Som

Conforme descrito nos tópicos anteriores, a velocidade de propagação do som, aqui definida como c_0 , é geralmente determinada pela densidade e as propriedades elásticas do meio.

Para um gás ideal, c_0 pode ser expresso como apresentado na equação 18 [13].

$$c_0 = \sqrt{\gamma \cdot \frac{P_0}{\rho_0}} = \sqrt{\gamma \cdot r \cdot T_k} \quad (18)$$

Onde:

$\gamma = \frac{c_p}{c_v}$ é a razão entre o calor específico do gás, a uma pressão constante, e o seu calor específico, a um volume constante. Para o ar, tem-se $\gamma = 1,402$.

P_0 é a pressão estática do gás, que a 1 atm é igual a $1,013 \cdot 10^5$ N/m²;

ρ_0 é a densidade específica do gás, igual a 1,293 kg/m³ para o ar a 1 atm e 0 °C;

r é a relação entre a constante universal dos gases e o peso molecular do gás;
 T_k é a temperatura expressa em kelvin.

Substituindo os valores apresentados para o ar na equação 18, tem-se que a velocidade do som no ar a 0 °C é igual a 331,6 m/s.

Como a razão $\frac{P_0}{\rho_0}$ é constante para uma pressão variável, mas com temperatura constante, idealmente c_0 é, igualmente, independente da pressão. Para um gás real, c_0 apresenta uma pequena dependência de pressão [13].

A dependência da temperatura de um gás ideal pode ser visualizada reescrevendo a equação 18 na forma da equação 19 [13]:

$$c_0 = c_{ref} \sqrt{1 + \frac{T}{273}} \quad (19)$$

Onde:

c_{ref} é a velocidade do som a 0° C;

T é a temperatura em °C.

Nos líquidos, a expressão para c_0 é dada como apresentado na equação 20 [13].

$$c_0 = \sqrt{\frac{K_s}{\rho_0}} \quad (20)$$

Onde:

K_s é o módulo volumétrico de elasticidade, que também pode ser representado por B (do inglês *bulk modulus*) e está apresentado na equação 21 [13].

$$K_s = B = -\Delta p \cdot \frac{V}{\Delta V} = \Delta p \cdot \frac{\rho}{\Delta \rho} \quad (21)$$

Onde:

Δp é a pressão aplicada ao gás;

V é o volume inicial do gás;

ΔV é a variação de volume do gás originada pela aplicação da pressão.

Facilmente observa-se que $-\frac{V}{\Delta V}$ é igual a $\frac{\rho}{\Delta\rho}$.

O módulo volumétrico de elasticidade representa uma medida das propriedades elásticas das substâncias, ou dos meios que as contém, sendo tanto maior quanto menor for a variação do volume da substância quando aplicada a pressão. B mede diretamente a resistência das substâncias à compressão. Ou seja, B é maior quanto maior for a resistência de uma substância à compressão [13].

Observa-se facilmente o conceito do módulo volumétrico de elasticidade através de uma comparação simples. Um cilindro preenchido de ar, quando submetido a uma pressão fará com que o ar seja comprimido, ou seja, ocupe menos espaço, aumente sua densidade. Isso caracteriza um elevado $\Delta\rho$. Se por outro lado, realizar-se o mesmo experimento com o cilindro preenchido de água, a compressão será mínima, ou seja, a água continuará ocupando praticamente o mesmo espaço, sua densidade permanecerá constante. Isso caracteriza um $\Delta\rho$ igual a zero ou muito pequeno. Vê-se, portanto, que $\Delta\rho$ é maior quanto mais elástico for o material, neste caso é muito maior para o ar do que para a água [13].

Analisando a condição de B nos dois casos apresentados, conclui-se que, certamente, porque $\rho_{H_2O} > \rho_{ar}$, $\Delta\rho_{H_2O} < \Delta\rho_{ar}$ e $B \propto \frac{\rho}{\Delta\rho}$. Ou seja, no cálculo de B da água, e relativamente aos valores do ar, o numerador é maior e o denominador é menor. Os dois fatores intensificam a sentido de tornar $B_{H_2O} > B_{ar}$. Como afirmado, B é maior para a substância mais resistente à pressão, nesse caso a água [13].

Quanto aos sólidos, o módulo de elasticidade que deve ser utilizado é o módulo de elasticidade de Young. O módulo de Young pode ser definido como uma versão unidimensional do módulo volumétrico da elasticidade, já que em um sólido a variação de volume dá-se essencialmente na direção da compressão (ou alongação). Assim, a definição do módulo de Young Y é semelhante à anterior, utilizando-se L (comprimento) no lugar de V (volume). Tem-se, então, a equação 22 relativa a definição apresentada [13].

$$k = Y = \frac{F}{A} \cdot \frac{L}{\Delta L} \quad (22)$$

Onde:

L é o comprimento do sólido em repouso;

F é a força aplicada ao sólido;

ΔL é a variação do comprimento após a aplicação da força F .

Nota-se que para um sólido também se define o módulo volumétrico de elasticidade e deve-se entrar no cálculo da velocidade do som o módulo de Young [13].

No âmbito de uma descrição geral para gases, líquidos e sólidos, pode-se simplesmente pensar no módulo de elasticidade k . Embora isso não seja rigorosamente verdade, pode-se pensar em uma primeira abordagem que em um material mais rijo tem-se um valor maior de B . Por exemplo, intuitivamente é possível compreender que o aço é menos elástico que o plástico, apresentando maior oposição a alterações elásticas. O plástico, por sua vez, é menos elástico que o água, que é menos elástica que o ar. Ou seja, $k_{aço} > k_{plástico} > k_{H_2O} > k_{ar}$ [13].

Diante do exposto, ao se relacionar as equações 20 e 21, tem-se a equação 23 [13].

$$c_0 = \sqrt{\frac{\Delta p}{\Delta \rho}} \quad (23)$$

Vê-se que nos líquidos a velocidade do som é maior do que nos gases, pois têm valores menores de $\Delta \rho$. No caso dos sólidos, a obtenção da expressão não se apresenta de modo tão simples, pois a expressão do módulo de Young não permite a mesma simplificação. A comparação da equação 20 para gases e líquidos de um lado e sólidos do outro, mostra que k e ρ são simultaneamente maiores para sólidos do que para gases e líquidos. O efeito de um maior valor de k para os sólidos, no numerador, pode, eventualmente, ser compensado por um valor maior de ρ . Na verdade, verifica-se de uma forma geral que o aumento de k dos líquidos para sólidos é proporcionalmente maior do que o aumento de ρ . Por isso, a velocidade de propagação do som nos sólidos é maior do que nos gases e nos líquidos [13].

A Tabela 3 apresenta as velocidades médias do som em diversos materiais.

Tabela 3 – Velocidade média do som em diferentes meios [13].

Meio	c (m/s)
Ar (0 °C)	331,6
Ar (20 °C)	343,6
Água	1480
Água do mar	1522
Alumínio	4420
Aço	6000

2.1.3 Ultrassom

O comportamento das ondas ultrassônicas é o mesmo das ondas audíveis, ou seja, é necessário um meio elástico, que pode ser sólido, líquido ou gasoso, para que haja propagação. A velocidade de propagação do ultrassom depende exclusivamente das propriedades do meio, estando sujeita a onda ultrassônica a reflexão, refração e difração [19].

O principal modo de geração do sinal ultrassônico é através de efeito piezoelétrico, característica que pode ser observada em alguns tipos de cristais. Esse efeito piezoelétrico consiste na geração de uma diferença de potencial elétrico entre as extremidades do material quando submetido a uma deformação mecânica ou, através do processo inverso, a geração de uma deformação mecânica do material quando submetido a uma diferença de potencial elétrico aplicado entre suas extremidades, sendo as suas duas faces opostas do cristal [19].

Portanto, submetendo as faces opostas de um cristal piezoelétrico a uma corrente elétrica alternada com frequência superior a 20 kHz, será observado uma vibração mecânica desse cristal na mesma frequência da corrente elétrica de excitação, gerando-se assim uma onda ultrassônica. A geometria dos cristais piezoelétricos é calculada de forma que sua frequência natural de vibração seja igual a frequência da corrente elétrica de excitação, maximizando, desta forma, sua amplitude de vibração, sua eficiência e, conseqüentemente, a energia propagada [19].

Existem algumas vantagens para o uso de frequências ultrassônicas quando comparadas com as infrassônicas. O ultrassom gera ondas de menor comprimento de onda, o que é essencialmente importante para pequenas amostras; os coeficientes de absorção são usualmente mais elevados e, conseqüentemente, mais fáceis de serem mensurados; e as ondas associadas às altas frequências são mais facilmente direcionadas [19].

2.2 Medidor de Vazão Baseado em Tempo de Trânsito

A física básica desse princípio pode ser atribuída ao físico inglês e vencedor do prêmio Nobel, Lord Rayleigh. Seu livro sobre a teoria do som (*The Theory of Sound* [20]), publicado em 1877, descreve a propagação de ondas sonoras em sólidos e gases.

O método de medição acústica baseia-se no fato de que a velocidade de propagação de uma onda acústica c e a velocidade da vazão v são somados vetorialmente [16]. A Figura 6 apresenta a base desse método.

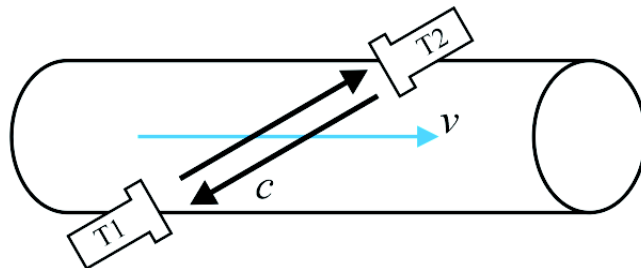


Figura 6 – Vetores de propagação da onda acústica e da vazão [16].

Este tipo de medidor de vazão mede a diferença nos tempos de trânsito entre dois pulsos ultrassônicos transmitidos do transdutor 2 (T2) para o 1 (T1), t_{21} , e do transdutor 1 (T1) para o 2 (T2), t_{12} , através do escoamento do fluido [16], como mostrado na Figura 7.

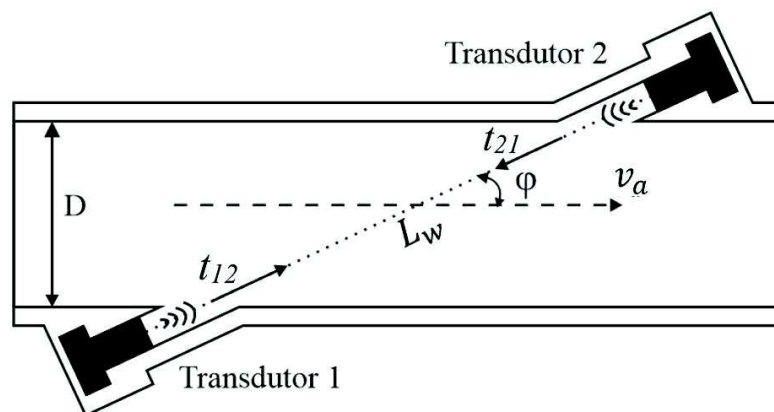


Figura 7 – Princípio de medidor es ultrassônicos por tempo de trânsito [16].

Se não existirem componentes transversais de vazão no duto, estes dois tempos de trânsito dos pulsos acústicos são dados pelas equações 24, tempo de trânsito do pulso

ultrassônico do transdutor 1 para 2, e 25, tempo de trânsito do pulso ultrassônico do transdutor 2 para 1 [16].

$$t_{12} = \frac{L_w}{c \pm v_a \cdot \cos\varphi} \quad (24)$$

$$t_{21} = \frac{L_w}{c \mp v_a \cdot \cos\varphi} \quad (25)$$

Onde:

L_w é a distância no fluido entre os dois transdutores,

c é a velocidade do som nas condições de operação,

φ é o ângulo entre o eixo axial do duto e o caminho acústico,

v_a é a velocidade média axial ao longo da distância L_w .

O som que se propaga no sentido do escoamento do fluido será mais rápido do que o som que se propaga no sentido contrário ao escoamento do fluido [16].

Uma vez que os transdutores são geralmente utilizados tanto como transmissores e receptores, a diferença no tempo de viagem pode ser determinada com o mesmo par de transdutores. Assim, a média da velocidade axial \bar{v}_a ao longo do caminho acústico é desenvolvida conforme apresentado abaixo e dada pela equação 26 [16].

$$\bar{v}_a = \frac{L_w}{2 \cdot \cos\varphi} \cdot \left(\frac{1}{t_{21}} - \frac{1}{t_{12}} \right)$$

$$\bar{v}_a = \frac{D}{2 \cdot \cos\varphi \cdot \sin\varphi} \cdot \left| \frac{1}{t_{21}} - \frac{1}{t_{12}} \right|$$

$$\bar{v}_a = \frac{D}{\sin(2 \cdot \varphi)} \cdot \left| \frac{1}{t_{21}} - \frac{1}{t_{12}} \right| \quad (26)$$

Onde:

D é o diâmetro do duto por onde o fluido escoar.

Por exemplo, seja um duto cilíndrico fechado com diâmetro $D = 150$ mm, ângulo $\varphi = 60^\circ$, velocidade da vazão $v_a = 1$ m/s e temperatura da água igual a 20°C ($c = 1480$ m/s). Isto resulta em tempos de transmissão de, aproximadamente, $117\ \mu\text{s}$ e uma diferença de tempo Δt ($\Delta t = t_{12} - t_{21}$) da ordem de 79 ns. Para alcançar uma precisão de 1% do fundo de escala correspondente, Δt tem que ser medido com uma resolução de pelo menos 790 ps ($7,9 \cdot 10^{-10}$ s).

No método ultrassônico para medição de vazão baseado no tempo de trânsito, pulsos ultrassônicos com alguns ciclos são transmitidos em cada direção e é medido o tempo transcorrido da transmissão até a detecção pelo transdutor de recepção [16].

A Figura 8 ilustra a relação entre os tempos t_{21} e t_{12} , sendo t_m o tempo médio entre eles.

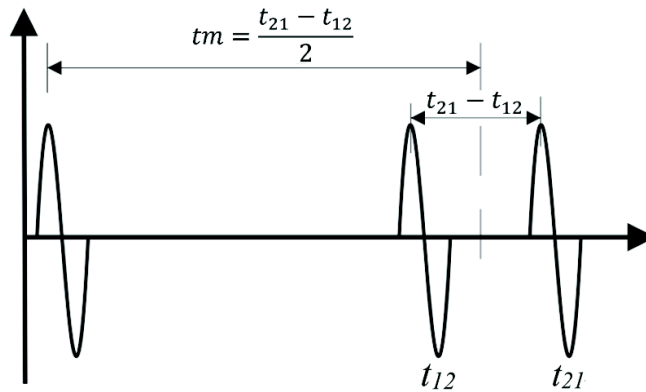


Figura 8 – Diagrama explicativo da medida baseada em Tempo de Trânsito [16].

Como exemplo, alguns exemplos de pulsos são apresentados [21].

Medição de água:

- Tubo com 50 mm de diâmetro
- Pulso com 6 ciclos
- Portadora de 1 MHz
- 1,5 mm de comprimento de onda
- Pacotes de ondas com aproximadamente 9 mm de comprimento

Gás doméstico:

- Tubo com 12 mm de diâmetro
- Pulso com aproximadamente 13 ciclos
- 2 mm de comprimento de onda

- Pacotes de ondas com aproximadamente 26 mm de comprimento

Técnicas normais para medição de tempo não são capazes de atender as exigências que devem ser atendidas para medição de vazão através do tempo de trânsito, sendo necessário a utilização de técnicas específicas para obter-se sucesso. A vantagem da abordagem considerada como o “estado da arte” para medição digital real da vazão é a possibilidade de se processar o valor medido diretamente por um microcontrolador/microcomputador, sem prejuízo aparente por atrasos nos circuitos relacionados. Os problemas mais delicados do processo estão relacionados com a capacidade de alcançar a resolução necessária e lidar com a instabilidade de portas lógicas digitais. Um conceito importante aplicado à técnica de medição é que se os sinais são amostrados em um maior número de vezes (N_n), a resolução aumenta com o número de amostras "oversampling". Este conhecimento, não só é aplicado para sinais analógicos, mas também para medições do tempo de trânsito, e é utilizado na tecnologia atual dos medidores que utilizam esse princípio. O tempo de trânsito t (t_{12} e t_{21}), dependendo da distância que o pulso ultrassônico precisa percorrer através do fluido, é medido várias vezes. Devido a este fato, utiliza-se a relação do tempo de trânsito em função de várias amostragens apresentada na equação 27 [13].

$$t = \frac{1}{N_n} \cdot \int_0^{\tau} \frac{1}{f} dt \quad (27)$$

Onde:

N_n é o número de amostras realizadas;

τ é o tempo de integração;

f é a frequência.

No diagrama de blocos da Figura 9, dois contadores são utilizados. O primeiro contador N_i é temporizado durante o período de medição por um oscilador de quartzo estável. O segundo faz a contagem do número de amostras N_n . A medição é encerrada após alguns milissegundos e depois de ter atingido o valor de número inteiro em N_n . As duas contagens de N_i e N_n são usadas para calcular o tempo de propagação t_{12} ou t_{21} , dividindo N_i por N_n [13].

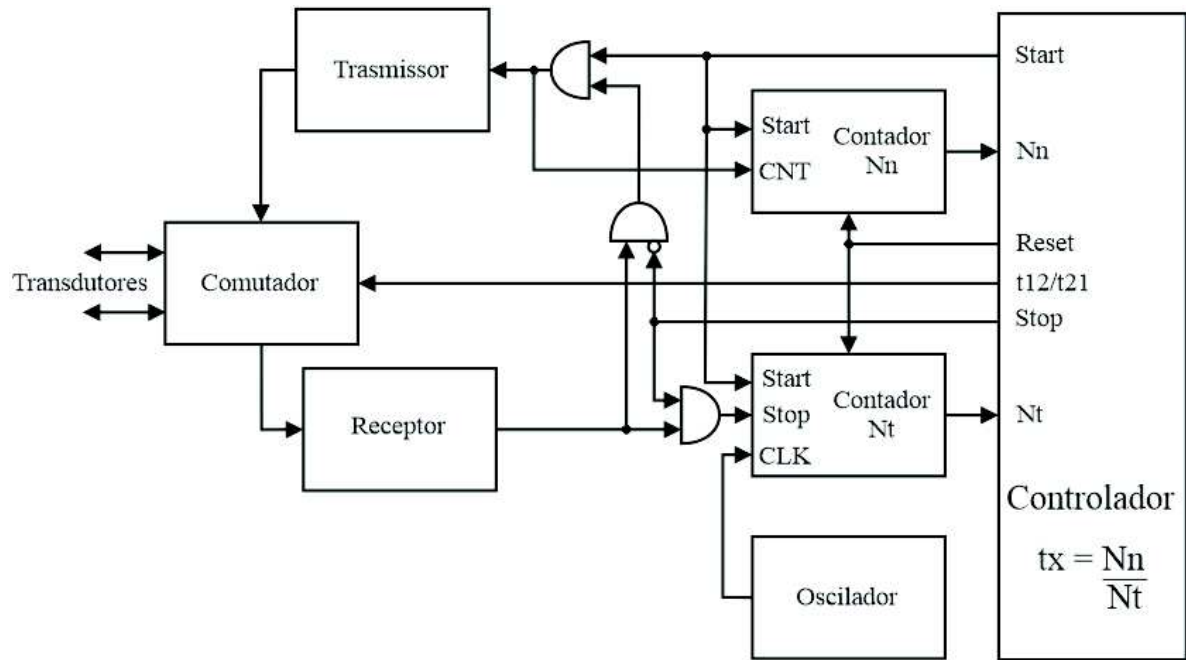


Figura 9 – Diagrama de blocos de um medidor ultrassônico por tempo de trânsito utilizando várias amostras para obter uma elevada resolução [13].

A resolução r da medição do tempo de trânsito é calculada através da equação 28 [13].

$$r = \frac{1}{N_n \cdot f} \quad (28)$$

As vantagens desse método para medidores de vazão ultrassônicos baseados em tempo de trânsito são [13]:

- A resolução da medida de velocidade é constante (normalmente 0,8 mm/s);
- A precisão depende quase exclusivamente da estabilidade e do coeficiente de temperatura do oscilador de quartzo;
- Devido às várias amostragens, é utilizada a média da instabilidade da lógica digital, mitigando seu efeito.

O transdutor compreende o elemento piezelétrico que converte a energia elétrica em acústica e/ou vice-versa e a estrutura básica para suportar o elemento piezocerâmico e fornecer as conexões elétricas necessárias. O projeto do transdutor implica na escolha do elemento piezoelétrico, a determinação de dimensões adequadas, a frequência de ressonância e a construção para suportar o estresse térmico e mecânico. Buscar a resposta eletroacústica ideal

e a melhor adequação da impedância acústica Z dos diferentes elementos transdutores é fundamental. A equação 29 é utilizada para determinar a impedância acústica [13].

$$Z = \rho \cdot c \quad (29)$$

Onde:

ρ é a resistividade do meio;

c é a velocidade do som.

Devem ser otimizados não somente para as formas de onda detectadas pelos circuitos eletrônicos, mas também a perda de energia tem de ser minimizada. Devido à grande versatilidade de tamanhos de tubos e as condições da vazão, há um número considerável de diferentes configurações de sensor para medidores de tempo de trânsito [13]. Uma exemplificação do transdutor ultrassônico é apresentada na Figura 10.

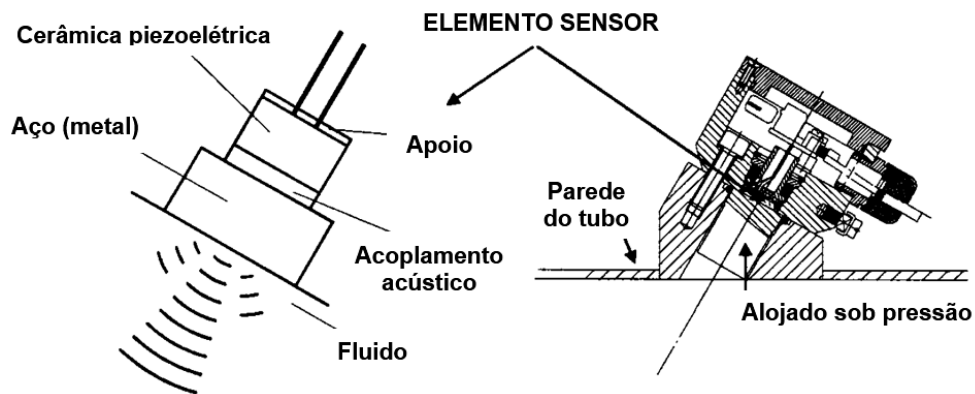


Figura 10 – Princípio e exemplo dos transdutores ultrassônicos. O elemento sensor pode ser modificado mesmo sobre pressão [13].

Devido às dimensões reduzidas em tubos de pequeno diâmetro, nesses casos é necessário passar o pulso ultrassônico diretamente pelo eixo de escoamento do tubo para assegurar que o comprimento do caminho percorrido pelo pulso é suficiente. A Figura 11 mostra o exemplo de uma secção de tubo axial do sensor. O limite recomendado de tamanho do tubo para este tipo de medição é de, aproximadamente, 0,075 m. Esse método pode sofrer influência de turbulências provocadas nas curvas da tubulação [13].

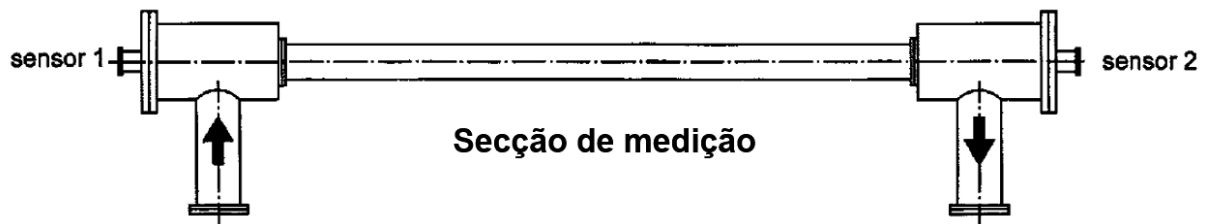


Figura 11 – Posicionamento axial dos sensores. O pulso ultrassônico passa diretamente pelo eixo axial do tubo [13].

Muitos fabricantes fornecem dispositivos de medição completos com transdutores ultrassônicos montados em ambos os lados de uma secção de medição. Tais sensores, mostrados na Figura 12, são geralmente chamados "radiais", devido ao posicionamento dos transdutores. Um limite recomendado de tamanho do tubo para sensores do tipo radial é de cerca de no mínimo 100 mm. Os fabricantes fornecem soluções completas para medições ou para montagem em campo em tubulações existentes, método não invasivo [13].

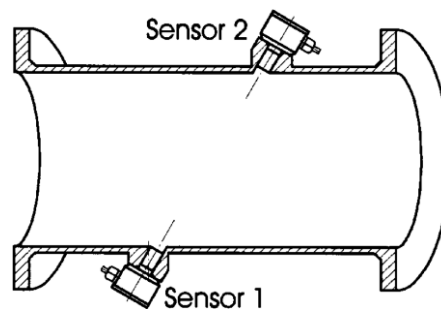


Figura 12 – Sensor do tipo radial [12].

Sensores do tipo radial são muitas vezes utilizados em aplicações de linha existente, onde é desejável fazer a instalação sem corte do tubo. Para atender a essa exigência, os transdutores para montagem em campo podem ser cimentados, perfurados ou soldados em uma seção de tubo existente. Com essa técnica é possível realizar medições em secções com diâmetros de até 13 metros ou mais [13].

Caso haja uma instalação na qual a parede do tubo não possa ser penetrada pelos transdutores, a utilização de braçadeiras pode ser uma boa opção. Essa técnica pode provocar uma menor precisão e ser um pouco mais complexa para calibrar. As braçadeiras são aplicadas em processos que não podem ser interrompidos. Essa técnica é conhecida como não invasiva [13].

Em canais abertos, os transdutores são normalmente fixados nas paredes do canal. A Figura 13 mostra um exemplo de um sensor de canal aberto. O elemento piezocerâmico é colocado sobre uma esfera para permitir uma ampla gama de possibilidades de montagem [13].

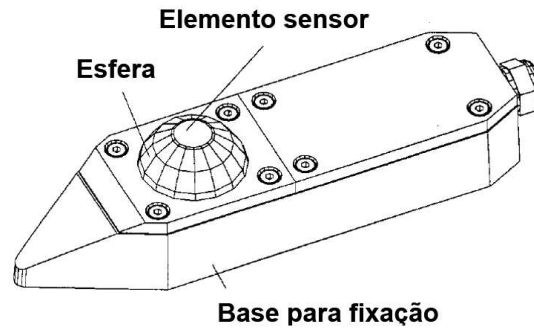


Figura 13 – Sensor para canais abertos com elemento sensor montado sobre uma esfera móvel [13].

Uma das maiores dificuldades na aplicação de medidores de vazão ultrassônicos é o entendimento dos efeitos do perfil de velocidade do fluido que passa dentro do condutor. O perfil da vazão depende do fluido, do número de Reynolds (Re), da rugosidade relativa e da forma do condutor, distúrbios próximos aos sensores e outros fatores. O número de Reynolds é um parâmetro adimensional largamente utilizado na mecânica dos fluidos e representa a razão entre duas forças encontradas nos fluidos em escoamento: as forças de inércia e as forças viscosas [13].

Medidores baseados em tempo de trânsito consideram a velocidade v da vazão no meio do caminho sônico. A vazão por processo acústico Q_{ADM} , ou simplesmente Q , é, portanto, calculada através da equação 30 [13].

$$Q = \bar{v} \cdot A \quad (30)$$

Onde:

\bar{v} é a velocidade média do fluido na região entre os dois sensores;

A é a seção transversal a do condutor.

A fim de obter a média da velocidade de vazão \bar{v} , a medida da velocidade \bar{v}_a deve ser corrigida por um coeficiente hidráulico, k_h , que depende do tipo de condutor e do número de Reynolds [13].

Para alcançar o máximo desempenho e precisão dos medidores de vazão ultrassônicos, deve-se respeitar as exigências de existência de linha reta, como mostrado para alguns exemplos na Figura 14. Ao fazer isso, uma exatidão típica de 1 % ou maior da leitura pode ser conseguida, tanto em sistemas de medição com multi-percurso (*multipath*) quanto para sistemas de medição de vazão com percurso simples (*singlepath*). Se reduzido o trecho de reta, a precisão é automaticamente reduzida [13].

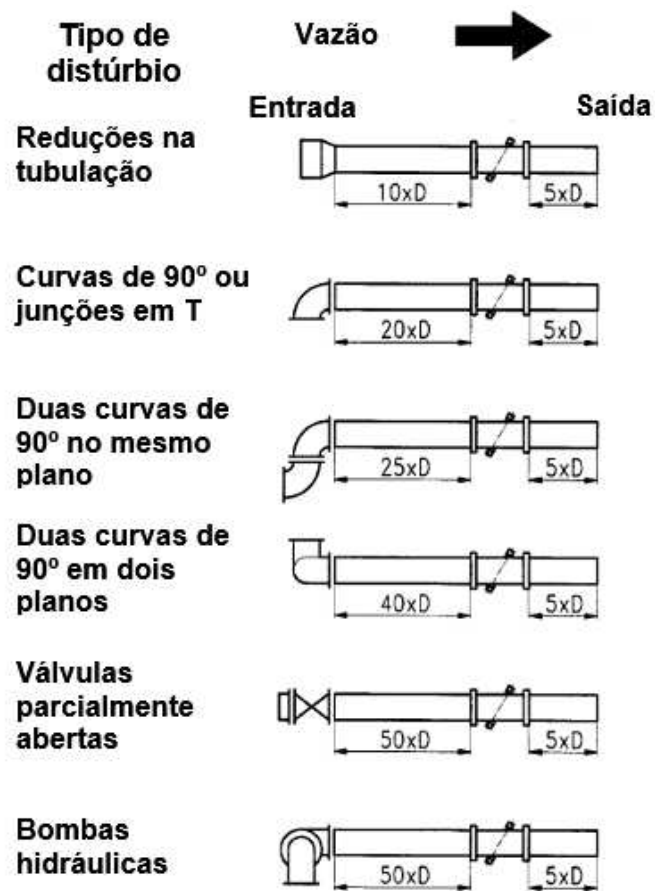


Figura 14 – Requisitos mínimos para trecho em linha reta para uma precisão de 1% com um único percurso ultrassônico para medição de tempo de trânsito [13].

Em algumas aplicações, uma precisão reduzida é aceitável. A exatidão máxima alcançada por um medidor de vazão ultrassônico com percurso simples dificilmente ultrapassa 1 %. Para aplicações que exigem maior precisão no processo de medida, um medidor de vazão ultrassônico com vários percursos deve ser instalado [13].

Medidores de vazão ultrassônicos baseados em sinais com vários percursos fornecem uma média dos diferentes componentes de vazão e a precisão de 0,5 % da leitura pode ser

alcançada. A Figura 15 ilustra quatro exemplos de arranjos possíveis utilizados em medidores com vários percursos em canal fechado [13].

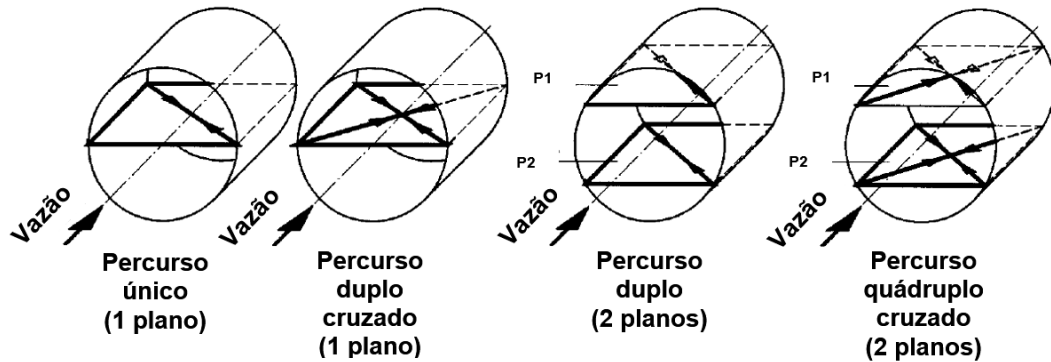


Figura 15 – Possíveis arranjos de percursos para medidores ultrassônicos de vazão [13].

A quantidade de percursos está diretamente ligada a exatidão da medição e, do mesmo modo, ao custo e complexidade do circuito de condicionamento. Um fluido pode apresentar turbulências ao escoar por uma tubulação e seu perfil pode ser modificado, sendo a utilização de vários percursos em planos diferentes uma maneira de melhorar a exatidão.

O número de Reynolds, Re , para medidores ultrassônicos que utilizam único percurso para secções transversais circulares e retangulares é dado pela equação 31 [13].

$$Re = \frac{\bar{v} \cdot D}{\nu} \quad (31)$$

Onde:

\bar{v} é a velocidade média ao longo da secção transversal;

D o diâmetro do tubo;

ν é a viscosidade cinemática dependente da temperatura, que é a razão da viscosidade dinâmica do fluido, μ , pela massa específica do fluido, ρ .

Em tubulações normais, existe um fluxo laminar, enquanto o número de Reynolds for inferior a 2600. A forma do perfil de velocidade é uma parábola, e a velocidade do ponto central, ou ponto r , é dada pela equação 32 [13].

$$v(r) = v_{max} \cdot \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] \quad (32)$$

Onde:

v_{max} é a velocidade máxima;

R é o raio do tubo;

r é o raio variável de 0 até R .

Entre um número de Reynolds Re de 2600 e 4000, o regime de escoamento transitório com comutação contínua entre laminar e perfil de velocidade turbulento passa a existir. Quando o número de Reynolds é superior a 4000, o perfil de velocidade entra no regime de escoamento turbulento [13]. O perfil de velocidade turbulento de uma vazão com eixo simétrico em um condutor fechado pode ser expressa pela equação 33.

$$v(r) = v_{max} \cdot \left(\frac{R - r}{R} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (33)$$

Onde:

n é dependente do número de Reynolds, que é dado pela equação 34 [13].

$$n = \frac{1}{p} = \frac{1}{[0,2525 - 0,0229 \cdot \log(Re)]} \quad (34)$$

Onde:

p também é um parâmetro dependente de Reynolds.

O coeficiente hidráulico de correção k_h é por definição dado pela equação 35.

$$k_h = \frac{\bar{v}}{v_a} \quad (35)$$

Onde:

\bar{v} é a velocidade média do ultrassom ao longo da secção transversal;

\bar{v}_a é a velocidade média na área analisada ao longo do percurso ultrassônico.

Integrando ao longo da secção transversal, tem-se o coeficiente hidráulico de correção para regime laminar, apresentado na equação 36 [13].

$$k_h = \frac{\frac{1}{A} \cdot \int_0^R \int_0^{2\pi} v(r) r dr d\theta}{\frac{1}{2 \cdot R} \cdot \int_{-R}^R v(r) dr} \quad (36)$$

Obtém-se, então, para o fluxo laminar um coeficiente hidráulico de correção de $k_h = 0,75$.

No regime de escoamento turbulento, o coeficiente hidráulico de correção, k_h , dependente do número de Reynolds, Re , e em uma secção transversal circular pode ser expresso pela equação 37 [13].

$$k_h = \frac{1}{[1,125 - 0,011 \cdot \log(Re)]} \quad (37)$$

Para uma secção transversal retangular, tem-se o coeficiente hidráulico de correção para regime turbulento dado pela equação 38 [13].

$$k_h = 0,79 + 0,02 \cdot \log(Re) \quad (38)$$

Para aplicações em hidrelétricas, o número de Reynolds Re geralmente ultrapassa o valor de 4000. A Figura 16 mostra a dependência do fator k_h em condutores fechados com a secção transversal circular, sobre o número de Reynolds. O número de Reynolds não só muda o seu valor como uma função da velocidade v de escoamento de um dado diâmetro D , mas também a viscosidade é fortemente dependente da temperatura cinemática $\nu(T)$. Sem levar em conta o valor correto de Re , pode-se facilmente obter erros do fator k_h e, conseqüentemente, na vazão Q na ordem de 2 % a 3 %. Medidores modernos baseados em tempo de trânsito com utilização de microprocessadores, podem atualizar o fator k_h quatro vezes por segundo, medindo a temperatura T do fluido com a mesma taxa [10].

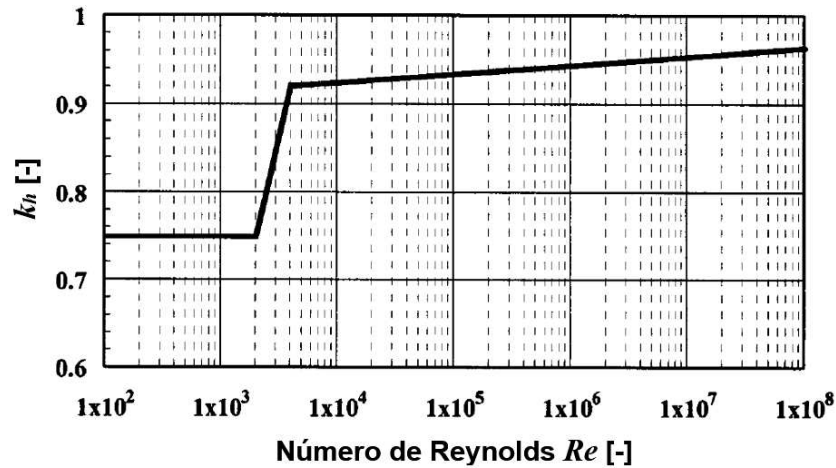


Figura 16 – Dependência do coeficiente hidráulico de correção k_h na medição com um único percurso para o número de Reynolds Re [10].

Considerando-se uma tubulação circular, aplicando a equação 26 na equação 30 e levando em consideração o coeficiente hidráulico de correção k_h , tem-se que a vazão pode ser calculada a partir da relação entre os tempos de trânsito, apresentado na equação 39.

$$Q = \frac{\pi \cdot D^3}{4 \cdot \text{sen}(2 \cdot \varphi)} \cdot \left| \frac{t_{21} - t_{12}}{t_{12} \cdot t_{21}} \right| \cdot k_h \quad (39)$$

2.3 Transdutores

Uma das características mais importantes do projeto mecânico de um medidor ultrassônico é o transdutor com a solução implementada para sua fixação na estrutura. O transdutor, quando devidamente escolhido, aumenta a eficiência do sistema e facilita o trabalho de todos os circuitos envolvidos no condicionamento dos sinais.

A definição do transdutor deve atender os seguintes requisitos:

- Eficiente transmissão e recepção de sinais acústicos na frequência desejada através da interface;
- Transmissão acústica insignificante através do corpo do medidor de vazão;
- Posicionamento preciso e permanente;
- Sem interferências devido ao fluido de operação; e
- Desempenho livre de problemas.

Para os modelos de medidores comerciais, os transdutores podem ser classificados conforme as seguintes categorias [16]:

Instalados em fábrica no medidor:

- Transdutores intrusivos - cavidade aberta;
- Transdutores não intrusivos - cavidade aberta;
- Transdutores não intrusivos - cavidade fechada.

Para qualquer um desses, o medidor pode ser calibrado “molhado” em fábrica. Apenas o primeiro é adequado para os gases.

Instalados em campo na tubulação:

- Transdutores intrusivos - cavidade aberta;
- Transdutores não intrusivos - cavidade aberta.

Somente a calibração em campo é possível. Apenas o primeiro é adequado para os gases.

Fixado em campo com abraçadeiras na parte externa da tubulação:

- Transdutores não intrusivos - transmissão através da parede do tubo.

Calibração “molhada” é praticamente impossível. Este transdutor não é adequado para os gases.

Onde na cavidade aberta há a exposição do transdutor e na fechada não.

A Figura 17 mostra algumas montagens típicas para os transdutores nos processos de medição de vazão através de ultrassom baseados nos princípios da medição do tempo de trânsito.

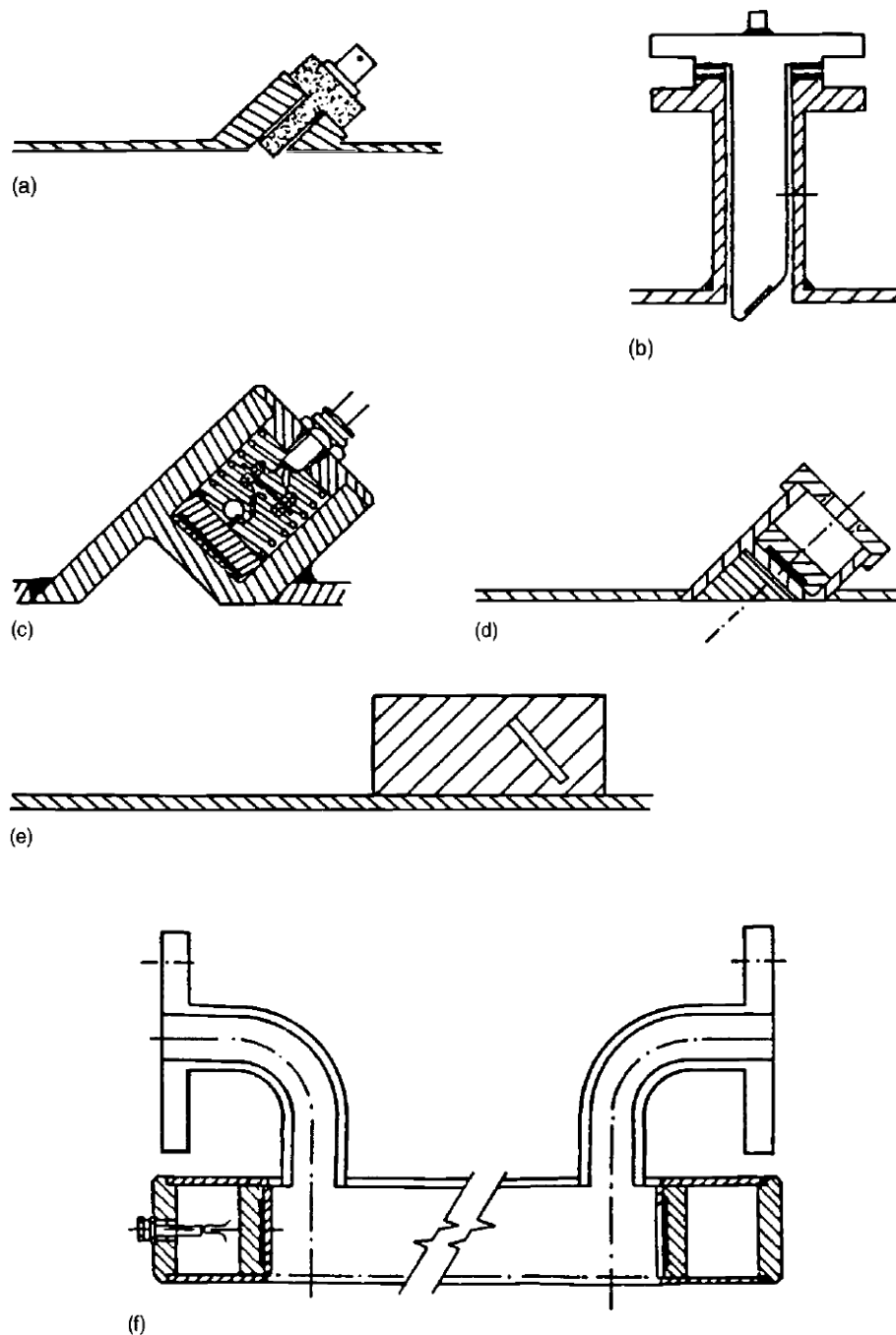


Figura 17 – Transdutores ultrassônicos e possibilidades de montagens [16].

A Figura 17 (a) mostra um transdutor “molhado” num bloco de montagem angular. O transdutor emite um estreito feixe sônico através de interfaces perpendiculares, e não é, portanto, refratado [16].

A Figura 17 (b) mostra um arranjo alternativo com suportes perpendiculares ao tubo e o transdutor com uma extremidade em ângulo [16].

Se o líquido é agressivo ou carregado de partículas, alguma forma de janela pode ser necessária. Neste caso, o transdutor pode ser montado como mostrado na Figura 17 (c), em que uma janela de metal é usada, mas onde todas as interfaces permanecem perpendiculares ao feixe. A cavidade é uma fonte de perturbação da vazão e acúmulo de partículas sólidas. Ambos podem provocar erros de falha de sinal ou de medição de vazão [16].

A Figura 17 (d) tem a cavidade preenchida com um material de qualquer tipo, tal como um epóxi ou resina. Idealmente, este material de enchimento deve ter um índice de refração acústica semelhante ao líquido, mantendo assim o índice de refração em um valor muito baixo, sendo que a curvatura do sinal acústico ao atravessar a interface será pequena. No entanto, a mudança do fluido ou de temperatura pode introduzir erros [16].

Uma vantagem importante dos suportes mostrados nas Figuras 17 (a) e 17 (b) é que a transmissão para fora da parede do tubo e do fluido é reduzida, e, na prática, a montagem do transdutor favorece a absorção da maior parte [16].

Com as montagens das Figuras 17 (c) e 17 (d), o processamento de sinal deve distinguir o sinal transmitido pelo fluido e os sinais espúrios em torno da parede do tubo. Já em 1981 alguns pesquisadores deram origem a alguns detalhes sobre formas de aumentar a largura de banda da placa piezoelétrica [16] [22].

A Figura 17 (e) mostra um sistema de montagem com braçadeira a no qual o transdutor é inteiramente externo e pode ser montado no tubo existente. Aqui, os problemas encontrados nos suportes mostrados nas Figuras 17 (c) e 17 (d) são aumentados [16].

Para tamanhos muito pequenos de tubos, as limitações do diâmetro e consequentes tempos de trânsito muito curtos podem ser compensados por um sistema com montagem do tipo mostrado na Figura 17 (f). A vazão entra em uma secção do tubo em que o feixe acústico é axial e, portanto, não há qualquer limitação sobre a separação de transdutores [16].

Para gases, é indispensável que os transdutores estejam em contato com o fluido e, portanto, são montados, como mostrado nas Figuras 17 (a), 17 (b) ou, possivelmente, 17 (f) [16].

2.4 Principais fabricantes na atualidade

Até meados de 2016, vários fabricantes se apresentam como especializados na medição de vazão. As empresas possuem as mais diversas origens e estão localizadas por todo o mundo.

A variação das características técnicas de um modelo semelhante em fabricantes diferentes é significativa. É evidente a oferta de produtos com vários níveis de qualidade e confiabilidade.

Alguns métodos são comumente explorados, como pressão diferencial, rotâmetros, flutuadores, Vortex e eletromagnético. Outros métodos, entre eles está o que realiza a medição da vazão baseado no tempo de trânsito de sinais ultrassônicos, são apresentados apenas por alguns fabricantes.

Até a data de redação dessa dissertação, os fabricantes que apresentam soluções para medição de vazão com transdutores ultrassônicos baseadas em tempo de trânsito, apresentam essa opção como sendo uma de suas melhores opções e destacam suas principais características. [23] [24].

Um dos fabricantes apresenta essa alternativa como a melhor solução para aplicações de medição de vazão de líquidos ou gases, agressivos ou corrosivos, quer se trate de medição de água ou outros fluidos, gestão de usinas de produção de energia, controle de dosagem e mistura de processos na indústria química ou para medir hidrocarbonetos líquidos na indústria de petróleo e gás. Outro fabricante destaca os modelos que trabalham de forma invasiva e não invasiva e sua capacidade de atender tubulações com grandes diâmetros. Destaca ainda a precisão, a facilidade de instalação, a segurança, relação custo benefício e o vasto número de possibilidades para sua aplicação. [23]

A metodologia estudada tem sido utilizada por alguns fabricantes de sensores e medidores de vazão e de outras grandezas. Entre estes, dois se destacam em nível mundial, Endress+Hauser e KROHNE.

Endress+Hauser, empresa suíça, é reconhecida como um dos principais fornecedores de equipamentos para medição industrial e automação, prestação de serviços e soluções para processos industriais em todo o mundo. Oferecem soluções para diversas variáveis de processos, como vazão, nível, pressão, análise de temperatura, registro e comunicação digital em uma ampla gama de indústrias, otimizando os processos no que diz respeito à eficiência econômica, segurança e proteção ambiental [23].

KROHNE, empresa alemã, é uma líder mundial em fabricação e fornecimento de soluções em instrumentação de processo industrial. Desde que foi fundada, em 1921, tem crescido constantemente em nível global [24].

Ambos os fabricantes oferecem excelentes soluções para as mais diversas aplicações. Os métodos utilizados para medição de vazão oferecidos são do tipo eletromagnético, Vortex, coriolis, pressão diferencial, ultrassônico e térmico.

O custo dos medidores varia entre as tecnologias e em função da faixa de medição.

Apesar do reduzido número de fabricantes que oferecem soluções baseadas no princípio em estudo, encontra-se um número grande de trabalhos e pesquisas relacionados a essa técnica. Publicações que mostram detalhes específicos de cada aplicação.

3 DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

A proposta para desenvolvimento do trabalho é construir uma planta que permita o controle da vazão e a sua medição através de um sensor de referência, conhecido, bem como o desenvolvimento de um protótipo que possibilite a análise do tempo de trânsito de sinais ultrassônicos trocados por dois transdutores, a fim de determinar uma relação válida entre eles. A solução não apresenta características que visam sua imediata comercialização, mas sim uma plataforma acadêmica para exploração dos conceitos teóricos e desenvolvimento de novas pesquisas e tecnologias. Ela possibilita a medição dos tempos de trânsito na unidade prevista pelo Sistema Internacional de Unidades, em segundos. Toda a análise dos resultados é feita com base nos sinais processados após medições diretas no duto que conduz o fluido.

No intuito de aprofundar no estudo do desenvolvimento de soluções para medição e processamento de sinais em sensores ultrassônicos de vazão baseados em tempo de trânsito, a experimentação prática está dividida em 6 partes:

- Pesquisa dos fabricantes que, até a data de realização desse estudo, ditam a tecnologia utilizada nesse tipo de medidor, a fim de estabelecer a tecnologia utilizada nesse trabalho;
- Escolha e aquisição de um medidor comercial de referência para validar o protótipo desenvolvido, a fim de levantar as características estáticas e dinâmicas da solução apresentada. Para a escolha foram considerados principalmente duas características: exatidão e custo;
- Estudo de pelo menos 3 fabricantes e até 2 modelos de transdutores ultrassônicos de cada um deles, a fim de estudar o sinal ultrassônico e escolher sensores com as melhores características;
- Desenvolvimento de protótipo mecânico para medição de vazão utilizando o tempo de trânsito em percurso único, a fim de permitir a captação e processamento dos sinais desse método de medição;
- Desenvolvimento de circuito eletrônico para processamento dos sinais, a fim de permitir a análise dos resultados;
- Testes, otimização do sistema e registro e análise dos resultados, a fim de concluir sobre o estudo realizado.

3.1 Etapas do desenvolvimento

Para a primeira fase, os principais fabricantes foram consultados e suas preferências tecnológicas foram comparadas.

Conforme descrito nos capítulos anteriores, a aplicação do embasamento do tempo de trânsito de sinais ultrassônicos para medição de vazão, pode atender diversos modelos. A mudança de um modelo para outro é justificada, na maior parte dos casos, ou pelas dimensões da tubulação ou pela impossibilidade de interrupção da linha de condução.

Para esse trabalho, o modelo escolhido foi o sistema de medição de vazão com percurso simples (*single-path*), onde o elemento transdutor está em contato direto com o fluido monitorado, sensor molhado e instalado de modo invasivo. O fluido utilizado nas experimentações é a água limpa, livre de sólidos em suspensão, com planta dimensionada e vazão controlada, a fim de evitar turbulência e surgimento de bolhas de ar, seja por captação direta ou por areação.

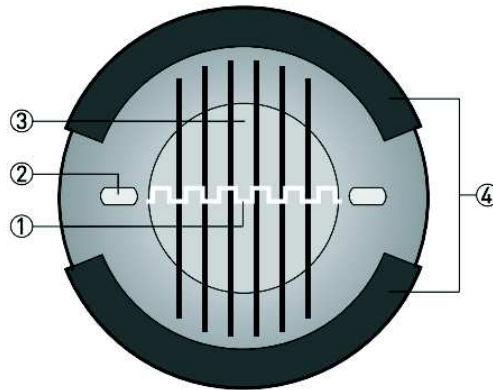
Na segunda fase, foi escolhido um medidor comercial para referência dos valores medidos. Foram levadas em consideração diversas características técnicas e operacionais dos modelos disponíveis, sendo as que tiveram maior peso no momento da decisão o custo, a exatidão, a precisão e a confiabilidade. O modelo escolhido foi o OPTIFLUX 1000 do fabricante KROHNE [24].

O sensor OPTIFLUX 1000 é um medidor de vazão eletromagnético, conhecido também como de tensão induzida. É um medidor que utiliza um princípio de medição baseado na Lei de Faraday.

O cientista Michael Faraday demonstrou pela primeira vez o princípio que leva o seu nome em 1832 e, desde então, foram desenvolvidos muitos equipamentos baseados na sua lei, o medidor de vazão eletromagnético é um desses equipamentos. O primeiro medidor de vazão eletromagnético foi desenvolvido no final da década de 40, porém, medidores de vazão eletromagnéticos modernos e eficazes somente surgiram no mercado no final dos anos 70. Apesar do medidor de vazão magnético ser baseado num princípio antigo, ele continua sendo aperfeiçoado e customizado para novas aplicações por alguns fabricantes.

A Lei de Faraday utilizada nos medidores de vazão, determina que o líquido deverá possuir uma condutividade elétrica mínima, e seu movimento através do campo magnético induz uma força eletromotriz que atravessa o líquido no sentido perpendicular ao campo

magnético induzido, sendo essa força diretamente proporcional à velocidade de escoamento, conforme ilustrado na Figura 18.



- (1) Tensão induzida (proporcional à velocidade do fluido)
- (2) Eletrodos
- (3) Campo magnético
- (4) Bobinas

Figura 18 – Princípio de funcionamento do medidor de vazão eletromagnético (Lei de Faraday) [25].

Devido ao campo magnético empregado na indução, o material do interior do medidor deve ser material não magnético, para não conduzir e nem modificar a direção do campo magnético gerado. Por meio de dois eletrodos inseridos em um plano perpendicular ao campo magnético torna-se possível a medição da força eletromotriz induzida. Essa força eletromotriz induzida não é afetada pela temperatura, viscosidade, pressão, turbulência, densidades específica/relativa e condutividade elétrica do líquido medido, desde que a condutividade elétrica esteja acima do valor mínimo exigido.

Projetado para medição de água, efluentes, leite ou quaisquer fluidos condutivos, o medidor eletromagnético OPTIFLUX 1000, pode ser utilizado, em estações de tratamento ou purificação de água e esgoto ou plantas de dessalinização. Além disso, suas características permitem o uso na medição ou detecção de vazamentos em redes de distribuição de água, incluindo a agricultura, tais como irrigação por aspersão, resfriamento ou sistemas de combate a incêndios.

Associado ao medidor OPTIFLUX 1000 utilizou-se um conversor IFC 050, do mesmo fabricante. Para atender às necessidades das diversas aplicações, o conversor IFC 050 possui saídas de 4-20 mA + HART, uma saída de pulso ativa e uma saída RS-485 Modbus para comunicação com microcontroladores e PLCs como opcional.

A caixa de alumínio à prova de choque do IFC 050 é coberta com uma camada de tinta dupla de proteção para resistir a ambientes salinos e sua eletrônica possui um revestimento extra contra umidade condensada para uso em áreas tropicais. Para a operação conveniente, o conversor IFC 050 pode ser encomendado para montagem remota em parede ou versão compacta.

Na terceira fase, foram identificados fabricantes de transdutores que possam ser aplicados na construção da planta de testes desejada.

Existem diversos fabricantes de transdutores, porém os melhores estão nos Estados Unidos, Suécia e Japão. Os fabricantes chineses oferecem diversas soluções, inclusive com desenvolvimento personalizado para a aplicação desejada, porém, a qualidade das amostras obtidas deixou muito a desejar nos quesitos de resistência física, acabamento, sensibilidade e estabilidade. Entre todos os consultados, apenas alguns fabricantes oferecem opções para aplicações molhadas, onde o transdutor fica em contato direto com o fluido.

Após testes com algumas amostras obtidas, em conformidade com as metas estabelecidas na idealização desse trabalho, o fabricante escolhido foi a D-Flow. A D-Flow é uma empresa baseada no conhecimento especializado em tecnologia de ultrassom, principalmente para medição de vazão, e possuem experiência de 21 anos em pesquisa de tecnologias ultrassônicas e sistemas para medição de vazão. A D-Flow fornece transdutores e *know-how* específicos para o desenvolvimento de medidores de vazão para cada aplicação.

Uma grande sinergia entre o objetivo desse trabalho, de se construir uma plataforma didática, e a D-Flow se dá pelo fato de ser ela uma empresa derivada de uma pesquisa universitária na área de medições de vazão ultrassônicas. A pesquisa desse princípio de medição é desenvolvida por eles desde 1982, quando foi iniciado o primeiro trabalho na Universidade de Lund, na Suécia. O resultado dessa pesquisa foi para a primeira versão do transdutor D-Flow. A empresa D-Flow foi criada em dezembro de 1995 com o intuito de desenvolver produtos baseados nos resultados das pesquisas. O modelo escolhido para esse trabalho foi o transdutor de 4 MHz, perfeitamente alinhado para a aplicação desejada.

A solução mecânica foi desenvolvida na quarta fase. Algumas concepções foram consideradas até que o modelo final fosse definido. O modelo escolhido segue as orientações do fabricante de transdutores sobre fixação e angulação desses elementos. Durante os testes, observou-se a necessidade de se isolar mecanicamente os transdutores de toda a estrutura criada para a medição. Isso foi necessário devido a vibração do transdutor em alta frequência, que em contato direto com a estrutura provoca a ressonância de toda a parte física, transferindo seu

efeito para o circuito eletrônico. Outra alternativa seria manter o circuito eletrônico isolado da estrutura mecânica de medição. Essa mesma dificuldade é observada em sensores de proximidade ultrassônicos, onde facilmente se observa a isolação do transdutor cerâmico através de um anel de borracha.

A quinta fase foi a que demandou maior intervalo de tempo, visto que toda a solução eletrônica foi desenvolvida e otimizada nessa etapa do trabalho. Apesar de se tratar de um conceito simples, o condicionamento dos sinais analógicos disponibilizados pelos transdutores para estarem aptos a serem entregues aos estágios de processamento e leitura dos resultados, merece atenção especial e muitos testes.

Inicialmente, foi realizada uma simulação numérica de medidores de vazão baseados em tempo de trânsito, buscando elucidar as incertezas devido ao perfil da vazão e temperatura dos fluidos. Em seguida, foi idealizado o circuito a ser utilizado e definidas as tecnologias e respectivas topologias para testes e análise dos resultados.

Há uma grande variedade de técnicas utilizando ultrassons para a medição da vazão de líquido e gás. Os medidores baseados em tempo de trânsito baseiam-se na diferença aparente da velocidade do som na direção do escoamento, e na direção oposta ao escoamento. Devido à simplicidade desse princípio de medição, esta é uma das técnicas mais comuns em aplicações industriais.

Este método tem a vantagem de poder ser intrusivo ou não-intrusivo, com os dois transdutores colocados sobre a superfície externa do tubo. O modelo desenvolvido para esse trabalho é do tipo intrusivo. Através da medição de dois tempos de trânsito de sinais ultrassônicos, a velocidade média da vazão pode ser determinada. Para converter este tempo, ou melhor, a diferença entre os tempos para a velocidade média ao longo da secção transversal, o conhecimento sobre o perfil de velocidade da vazão é essencial. A teoria sobre turbulência prediz o perfil da vazão no tubo de acordo com o número de Reynolds, Re , e com a geometria do tubo. Por conseguinte, o fator de correção k_h , denominado fator de medida ou fator hidráulico de correção, poderá ser obtido.

Algumas fontes de incerteza (geometria do tubo, rugosidade da tubulação, eletrônica, medição do tempo de trânsito, perfil da vazão) ocorrem nesta técnica. Sua estimativa é um assunto importante e de interesse, a fim de quantificar os seus efeitos sobre a medição da vazão. Aqui, considera-se o problema do perfil da vazão, sendo que sua influência sobre a precisão do medidor ultrassônico foi estudado por algumas décadas. No entanto, mesmo quando a vazão é constante e conhecida, ainda há alguma incerteza sobre o perfil, especialmente perto da parede.

Estimar essa incerteza é essencial para estimar o erro associado ao fator de correção hidráulica e, finalmente, a taxa de vazão. Além disso, para tentar reduzir a influência do perfil da vazão sobre o desempenho dos medidores, soluções baseadas em percursos ultrassônicos múltiplos podem ser uma boa opção.

Neste trabalho, consideram-se medidores de vazão com apenas um percurso. Toda a estrutura de tubulações e controle foi desenvolvida visando um sistema sem turbulências. Supondo, então, que o perfil de velocidade é conhecido e não possui turbulências, bastou estudar a melhor maneira para medir os tempos de trânsito e obter a vazão verdadeira. De fato, alguns fenômenos relacionados com a física da propagação do ultrassom são negligenciados neste processo:

- Classicamente, a estimativa do fator de correção hidráulico supõe raios retos, enquanto que o perfil de velocidade desvia caminhos acústicos;
- Devido aos fenômenos de turbulência, o perfil de velocidade verdadeiro oscila em torno de seu perfil médio no tempo e no espaço;
- A temperatura deve ser homogênea, enquanto gradientes de temperatura e flutuações térmicas turbulentas também significam desviar dos caminhos acústicos.

Considerando desprezados os pontos acima listados, sendo assumido como aceitável o possível erro causado por essa decisão, foi possível dar continuidade ao desenvolvimento eletrônico para o objetivo definido.

O diagrama de blocos da Figura 19, apresenta as partes do primeiro circuito eletrônico desenvolvido e responsável por condicionar os sinais produzidos e recebidos nos transdutores.

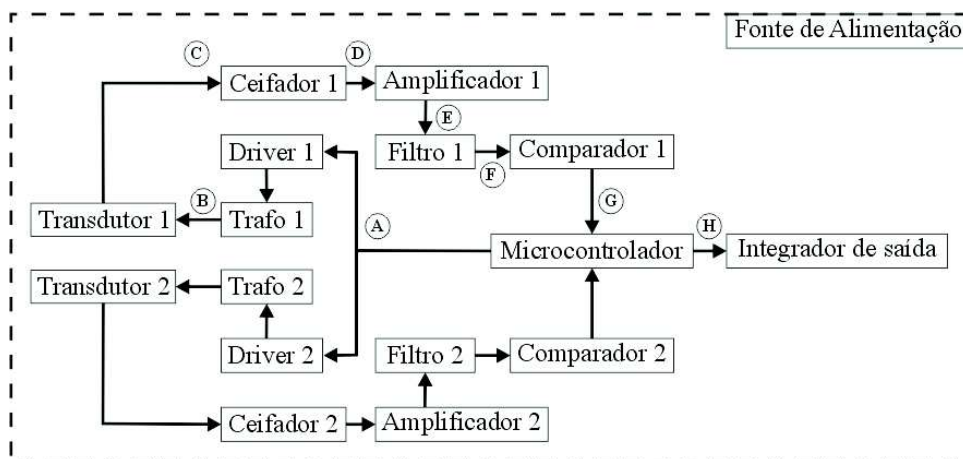


Figura 19 – Diagrama de blocos do circuito desenvolvido.

A fonte de alimentação é responsável pelo fornecimento de toda a energia necessária para o perfeito funcionamento do circuito apresentado, recebendo em sua entrada a rede alternada disponível em ambientes residenciais, comerciais e industriais. Ela é responsável por todo o fornecimento de energia para o circuito eletrônico e os transdutores.

Os transdutores 1 e 2 são os modelos D-Flow de 4 MHz especificados.

Os trafos 1 e 2 são transformadores utilizados para elevar o nível de tensão da fonte de alimentação, modulada pelo sinal de excitação fornecido pelo microcontrolador, para valores que garantam o perfeito aproveitamento dos transdutores. À princípio, os transdutores podem ser excitados com maiores níveis de tensão para ampliar sua capacidade de transmissão. Para a recepção, o processo deve ser o contrário, onde os valores recebidos são de reduzida amplitude e precisam ter sua sensibilidade aumentada.

Os drivers 1 e 2 são circuitos chaveadores de potência que elevam o potencial do sinal entregue pelo microcontrolador para realizar a excitação do primário de cada transformador. Sem os drivers de potência, o microcontrolador não seria capaz de passar as informações referentes a transmissão do sinal ultrassônico para os transdutores.

Os ceifadores 1 e 2 recebem o sinal proveniente do transdutor, onde, por razões lógicas, o sinal de transmissão possui uma amplitude bem maior que o sinal de recepção. Este circuito limita a amplitude dos sinais. O estágio seguinte não suportaria os elevados níveis de amplitude dos sinais. Os ceifadores apresentam a função de proteção contra os elevados níveis.

Os amplificadores 1 e 2 fazem a elevação do nível do sinal entregue pelos ceifadores, onde já se encontram os sinais de transmissão e recepção com a mesma amplitude, de modo a obter um nível ótimo para filtragem no estágio seguinte. A filtragem tem papel fundamental na estabilidade e precisão das medidas realizadas.

Os filtros 1 e 2 são utilizados no intuito de, se não eliminar, mitigar as grandezas de interferência. As grandezas de interferência são provocadas por ruídos eletromagnéticos ou por ruídos acústicos. Esse filtro é ajustado na mesma frequência de excitação do transdutor.

Os comparadores 1 e 2 têm como função adequar o sinal para facilitar sua leitura pelo circuito microcontrolador. Tomando como base as janelas recebidas, com sinal ultrassônico transmitido e recebido, entrega em sua saída duas janelas proporcionais sem o sinal ultrassônico, facilitando a leitura do tempo de trânsito.

O microcontrolador é o responsável pelo gerenciamento de todas as informações no processo de medida de vazão através de ultrassom baseada em tempo de trânsito.

O circuito integrador de saída faz a transformação de digital para analógico entregando em sua saída um sinal padrão industrial internacional. Esse sinal é proporcional a vazão em toda a sua faixa de sensibilidade. Esse circuito não faz parte da proposta inicial, mas devido às facilidades de se fornecer um sinal aplicável em ambientes industriais com as informações obtidas, decidiu-se por implementá-lo, tornando o sistema desenvolvido mais próximo de um modelo comercial. O sucesso desse incremento, possibilitará pesquisas de integração entre sensor e sistemas de controle industriais, PLCs, ou sistemas supervisórios.

Depois de concluída a fase de desenvolvimento da solução eletrônica para condicionamento do sinal e medição dos tempos de trânsito proporcionais à vazão, cabe a última fase do trabalho. Na sexta fase, após realizada toda a montagem mecânica e eletrônica, a planta é iniciada e os resultados colhidos e analisados. Nessa fase algumas alterações foram necessárias, simplificações foram vislumbradas e as adequações visaram sempre o melhor desempenho do sistema para atender os objetivos desse trabalho.

Depois de idealizado, o protótipo a ser utilizado para os testes e medições, deve ser montado.

Vale ressaltar que a proposta da solução apresentada é permitir a medição dos tempos de trânsito de pulsos ultrassônicos aplicados à medição de vazão. O sistema, bem como todas as medidas, busca alcançar os objetivos inicialmente estabelecidos.

Entre os fabricantes pesquisados, com destaques para Endress+Hauser e KROHNE, não foi identificado modelo comercial com apenas um percurso ultrassônico. Os modelos apresentados para medição de vazão ultrassônica baseada no tempo de trânsito utilizam dois ou mais percursos. Os modelos de maior destaque, multi-percurso apresentam exatidão de até 0,15 %, obtida com utilização de vários percursos. Portanto, para esse trabalho, a exatidão esperada é de, aproximadamente, 1 %.

3.2 Medidor de referência

Uma vez que o foco desse trabalho está na análise e tratamento dos sinais em sensores ultrassônicos de vazão baseados em tempo de trânsito, optou-se por um modelo para referência que apresentasse uma boa relação custo-benefício.

O objetivo da utilização desse medidor é possuir uma referência da vazão imposta ao protótipo desenvolvido, servindo, assim, de base para a análise dos resultados obtidos.

O sensor escolhido foi o OPTIFLUX 1000, mostrado na Figura 20, juntamente com o conversor de sinais IFC 050, mostrado na Figura 21, ambos do fabricante KROHNE. O diâmetro escolhido foi de 1 polegada e meia, visando facilitar a montagem e os testes do sistema.

O sensor OPTIFLUX 1000 apresenta as seguintes características técnicas [25] de interesse para este estudo:

- Design tipo sanduíche, onde a montagem é realizada com a utilização de flanges conectadas à tubulação, dispostas dos dois lados do sensor e unidas por tirantes;
- Leve e compacto para fácil manuseio e economia de espaço de instalação;
- Preço acessível;
- Excelente resistência química;
- Medições bidirecionais;
- Sem perda de pressão;
- Insensível às vibrações;
- Sem peças móveis internas, sem manutenção;
- Princípio de medição: Lei de indução de Faraday;
- Aplicação: Líquidos condutores;
- Fluido de referência: água;
- Condutividade elétrica do fluido: $\geq 300 \mu\text{S}/\text{cm}$;
- Temperatura: +10 até + 30 °C (+50 até + 86 °F);
- Pressão de operação: 1 bar / 14,5 psi;
- Erro máximo de medição com IFC 050: até 0,5 % do valor medido acima de 0,5 m/s. Abaixo de 0,5 m/s apresenta desvio $\pm 2,5 \text{ mm/s}$;
- Repetibilidade: $\pm 0,1 \%$ do valor medido, com no mínimo 1 mm/s;
- Faixa de medição: -12 até + 12 m/s (-40 até + 40 pés/s).



Figura 20 – Medidor de vazão OPTIFLUX 1000 [25].

O conversor IFC 050 apresenta as seguintes características técnicas [26] de interesse para este estudo:

- Saídas disponíveis: saída de corrente (incluindo HART), saída de pulso/frequência ativa, saída de status e Modbus;
- Operação com botões de toque;
- Excelente relação custo/desempenho;
- Montagem assimétrica possível;
- Instalação e operação simples;
- Display gráfico;
- Conversão de sinal extremamente rápida;
- Precisão de medição padrão: $\pm 0,5\%$ do valor medido ± 1 mm/s;
- Repetibilidade: $\pm 0,1\%$.



Figura 21 – Conversor de sinais IFC 050 [26].

O conjunto sensor/conversor de sinais escolhido atende as necessidades para monitoramento da vazão na planta de testes.

3.3 Estudo dos transdutores ultrassônicos

Não diferente do que ocorreu com os fabricantes de medidores de vazão, foram identificados diversos fabricantes de transdutores ultrassônicos em vários países.

Em função de outros estudos realizados anteriores a esse e da garantia da qualidade de seus produtos, um dos fabricantes analisados foi a empresa Airmar. Fundada em 1982, a americana Airmar trouxe seu primeiro produto para o mercado, um transdutor de painel de popa montada. Dois anos mais tarde, a empresa patenteou o TRIDUCER[®] multi-sensor que revolucionou a tecnologia marinha de sensores. Registrando inúmeras patentes e fabricando a mais ampla linha de sensores de profundidade, velocidade, temperatura e inteligentes, definiu o "padrão" de sensores no mercado marítimo. Com base nesta excelência, a Airmar mudou seu foco para transdutores de ultrassom que operam no ar e na água para uso industrial, bem como sensores integrados [27].

Outro fabricante analisado foi a chinesa Shenzhen Yujie Electronics, que fundada em 1996 é um fabricante profissional de placas cerâmicas piezoelétricas ultrassônicas e transdutores ultrassônicos. Fornece transdutores utilizados em aplicações industriais, aparelhos domésticos, aparelhos estéticos, equipamentos médicos e instalações comerciais [28].

O terceiro é a D-flow, uma empresa sueca proveniente da pesquisa do professor Jerker Delsing na área de medição de vazão ultrassônica. O professor Delsing começou sua pesquisa na Universidade de Lund, na Suécia e o resultado da pesquisa foi a primeira versão do D-Flow UFO ASIC. A D-Flow foi criada para criar produtos com base nos resultados da sua pesquisa [29].

Os transdutores estudados foram, o AT300 da Airmar, o HJ-3030/1M da Shenzhen Yujie Electronics, apresentado na Figura 22, e o D-Flow de 4 MHz da D-Flow.



Figura 22 – Transdutor ultrassônico HJ-3030/1M [27].

Para realização dos testes iniciais, buscou-se no mercado uma plataforma de testes desenvolvida e produzida pelos próprios fabricantes de transdutores. A ideia é utilizar um sistema seguro para testes e validação dos transdutores, tirando proveito, sempre que possível, do *know-how* utilizado nos circuitos de condicionamento dos sinais.

Os testes iniciais foram feitos utilizando o kit de desenvolvimento e avaliação de transdutores, *T1 Development Kit*, do fabricante Airmar. Este kit oferece o esquema eletrônico livre para consulta e permite a alteração da frequência de modo a atender diversos tipos de transdutores. O esquema eletrônico dessa ferramenta pode ser visualizado em detalhes na Figura 23.

Vale ressaltar que o circuito apresenta de maneira clara os módulos de geração do sinal ultrassônico, condicionamento do sinal para excitação dos transdutores e transmissão, recepção e condicionamento do sinal de chegada. Apesar de não ser aplicável à necessidade e ao objetivo desse estudo, o circuito comprovou a eficácia do modelo de base escolhido para o desenvolvimento eletrônico e serviu como plataforma de estudo para obtenção de conhecimento no trabalho com transdutores e sinais ultrassônicos.

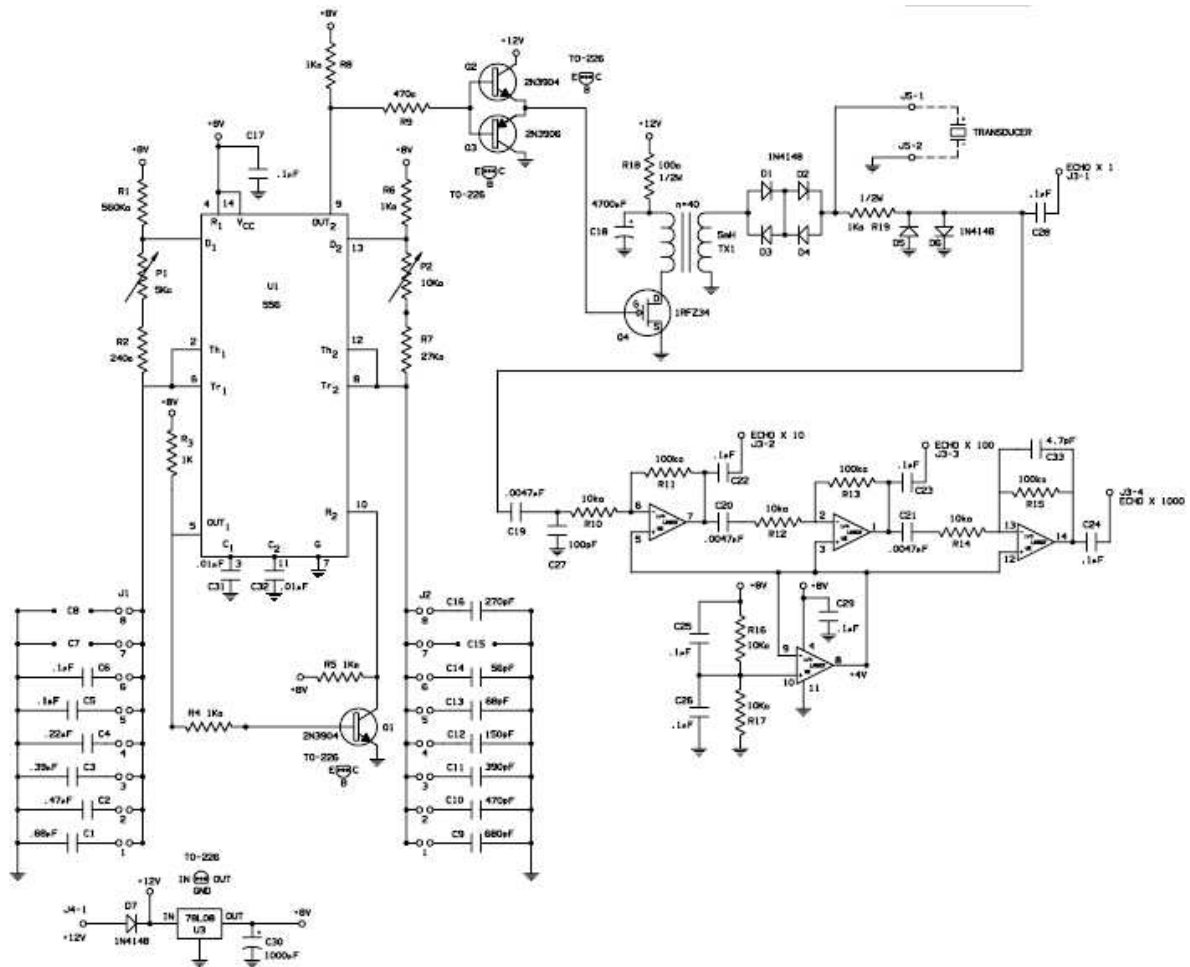


Figura 23 – Esquema elétrico do circuito inicial utilizado para testar os transdutores [30].

Para aperfeiçoar o registro dos resultados frente às características disponibilizadas pelos fabricantes, os transdutores foram testados com propagação do sinal ultrassônico no ar, verificando seu alcance e a qualidade do sinal recebido após sua entrega ao transdutor na condição de emissor. Vale lembrar que os transdutores são utilizados em um primeiro momento como transmissores e logo após como receptores, tendo o seu desempenho papel fundamental tanto no processo de transmissão como no processo de recepção do sinal. Ou seja, um transdutor pode apresentar excelente desempenho como transmissor, porém, se seu desempenho como receptor fica aquém do mínimo aceitável, sua aplicação poderá estar comprometida. Para possibilitar a aplicação de todos os sinais necessários, o kit de desenvolvimento utilizado nos testes precisou sofrer modificações para adequar sua capacidade de geração de sinais ultrassônicos na ordem de mega-hertz (MHz).

Cada transdutor recebeu uma excitação ultrassônica com frequência compatível ao seu perfil de operação. Os transdutores Airmar e D-Flow apresentaram resultados satisfatórios

quanto ao seu desempenho técnico e mecânico, tanto para seu perfil de transmissão quanto para sua sensibilidade de recepção. O transdutor Shenzhen não apresentou resultados que recomendem sua utilização nesta ou em outras aplicações. Entre os problemas observados, as amostras de Shenzhen apresentaram falhas mecânicas em seu processo de fabricação, algo similar a uma fabricação artesanal, que impediram seu contato direto com líquidos e deformou de forma significativa o sinal de excitação. Apresentou retorno imediato e indesejado após receber a excitação, mesmo com condições mínimas para haver retorno. A discriminação também ficou bastante abaixo dos demais. O casamento de impedâncias desse último transdutor se mostrou ineficiente e pobre em qualidade.

A Figura 24 apresenta um exemplo do sinal ultrassônico medido que foi utilizado para a excitação dos transdutores.

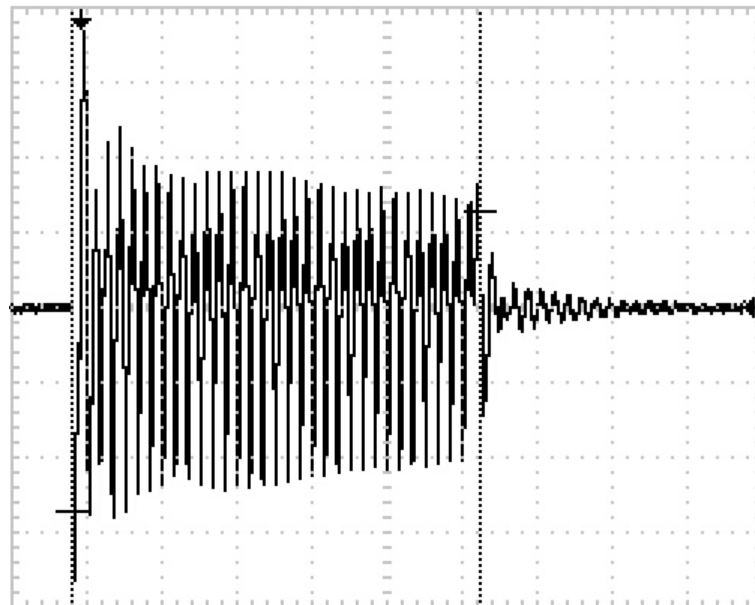


Figura 24 – Sinal ultrassônico de excitação dos transdutores.

Nesse exemplo de sinal ultrassônico é importante destacar que cada modelo de transdutor, em função de sua frequência de excitação e de seu alcance, necessita de um padrão específico de sinal para seu perfeito funcionamento. As características que mais sofrem alterações são a frequência do sinal e a quantidade de ciclos transmitida.

A Figura 25 apresenta a medida dos sinais de transmissão e recepção de um transdutor com boa qualidade em uma mesma tela.

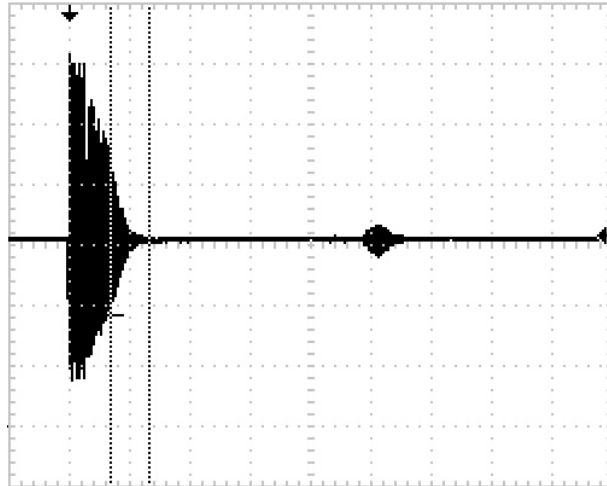


Figura 25 – Sinal ultrassônico enviado e recebido após seu retorno em condições normais.

Nessa medida fica evidente o conceito de tempo de trânsito, visto que os dois sinais ocorrem em momentos distintos. Quanto maior a distância ou a dificuldade de propagação do sinal ultrassônico, maior será o tempo necessário para receber o sinal pelo receptor após enviá-lo pelo transmissor. Vale destacar a qualidade dos dois sinais, transmitido e recebido, compatíveis com a qualidade dos transdutores utilizados nessa medida. A boa qualidade do transdutor e de seus sinais facilitará o condicionamento e a leitura das informações.

A Figura 26 apresenta a medição dos sinais de transmissão e recepção em um transdutor de qualidade inferior apresentados em uma mesma tela.

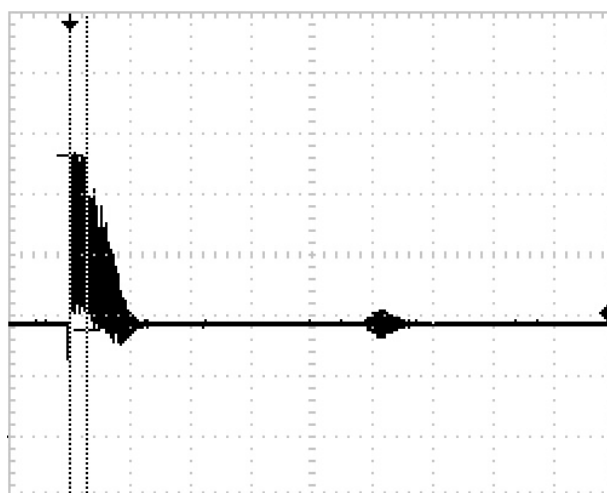


Figura 26 – Sinal ultrassônico enviado e recebido após seu retorno em condições anormais.

Nessa medida pode-se observar a diferença de qualidade dos sinais de transmissão e recepção quando comparado com a Figura 25. Vê-se a deformação, a perda de informações e o

maior nível de ruídos. Este transdutor, se utilizado, poderia dificultar todo o processo de condicionamento e leitura dos sinais.

Entre os dois modelos validados, o modelo D-Flow de 4 MHz [31] apresentou melhor desempenho para medição de vazão baseado em tempo de trânsito aplicado no monitoramento de água e foi utilizado no protótipo desenvolvido. A Figura 27 ilustra o transdutor escolhido.



Figura 27 – Transdutor ultrassônico D-Flow 4MHz [31].

Esse transdutor foi projetado para uso em aplicações com considerável aquecimento e oferece precisão em uma grande faixa dinâmica, indicando baixa necessidade de manutenção e pequenas perdas de carga. A norma EN 1434-1 [32] especifica os erros máximos permitidos para essa classe de transdutores e que são mostrados como uma referência para o transdutor avaliado.

A Figura 28 apresenta os resultados divulgados pelo fabricante do transdutor D-Flow 4 MHz aplicado na medição de vazão em percurso único sobre seu desempenho em função da EN 1434-1.

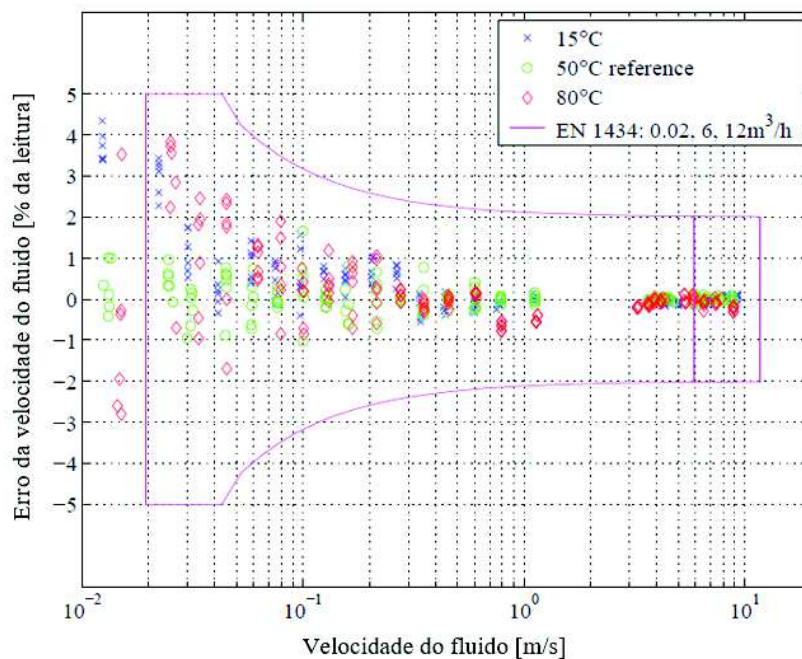


Figura 28 – Erros do Transdutor ultrassônico D-Flow 4 MHz em relação a EN1434-1 [33].

Optou-se por trabalhar com uma transmissão ideal com envio da frequência de 4 MHz em 20 ciclos através de uma janela de 5 μ s. Após implementada a geração do sinal através do microcontrolador, obteve-se uma janela de 5,25 μ s com 21 ciclos e frequência de 4,00 MHz. Esse foi o padrão de sinal utilizado nos testes do protótipo desenvolvido. A montagem da janela de transmissão pode ser observada na medição apresentada na Figura 29.

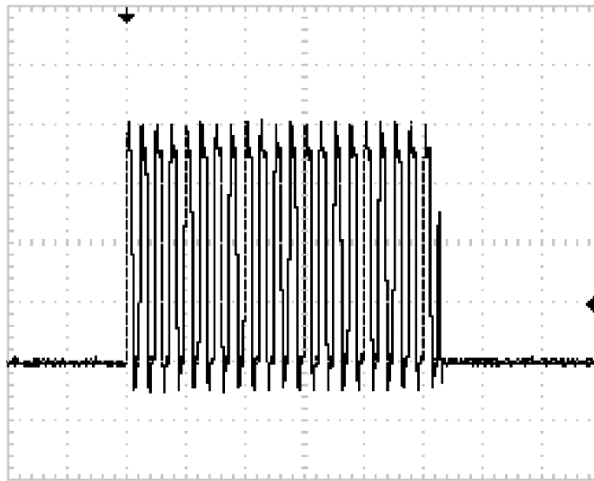


Figura 29 – Ajuste da janela de transmissão do sinal ultrassônico.

3.4 Desenvolvimento mecânico

Em um primeiro momento, o protótipo mecânico foi idealizado considerando a pior condição, onde, além de percorrer o fluido, o pulso ultrassônico deveria passar através das paredes da tubulação em uma configuração não invasiva. Deste modo, os testes poderiam ser realizados em qualquer tubulação compatível sem a necessidade de interromper o processo.

O artigo “*A study of ultrasonic propagation for ultrasonic flow rate measurement*” [34] contribuiu de forma significativa com sua pesquisa para a definição estrutural desse protótipo. Os erros nas medidas de vazão aumentam com os erros de ângulo de radiação ultrassônica inadequados. Mesmo que os erros de ângulo de radiação possam ser considerados pequenos quando comparados o projeto teórico e o prático, podem não ser insignificantes. Como resultado, as características de propagação ultrassônica através de tubulações metálicas necessitam de maior investigação.

A Figura 30 apresenta o resultado de um trabalho desenvolvido [34] para identificação dos erros e nessa imagem pode-se verificar a forte relação no erro promovido na medição de vazão por utilizar um transdutor mal posicionado.

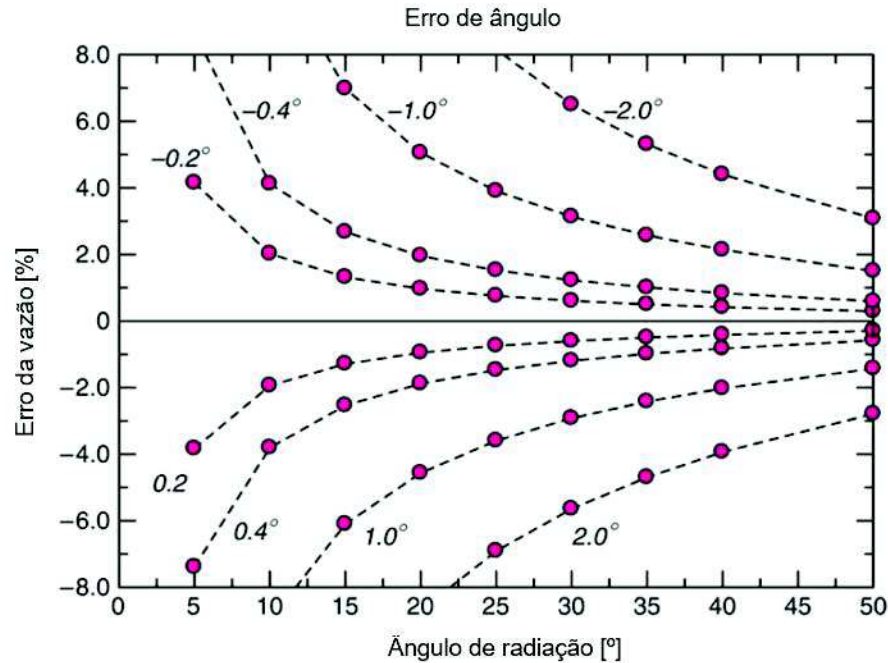


Figura 30 – Erros teóricos do sensor de vazão ultrassônico quando alterado o ângulo de radiação [34].

Apesar de ser a solução mais atraente oferecida pelos fabricantes por não necessitar interromper o processo para instalação dos transdutores, a medição não invasiva apresenta pontos críticos para seu desenvolvimento mecânico e sua perfeita utilização. Devido a limitações técnicas e orçamentárias, foi necessário alterar a proposta inicial para um modelo invasivo, com transdutor molhado. Essa alteração não afetou a proposta do trabalho, sendo ela a medição do tempo de trânsito e sua relação com a vazão independentes da estrutura mecânica adotada.

A estrutura utilizada foi construída com base nas orientações do fabricante de transdutores D-Flow. O ângulo de radiação adotado no protótipo é de 25° e o transdutor lançará e receberá o pulso ultrassônico diretamente a partir do fluido em deslocamento dentro do tubo. Um esboço da solução mecânica desenvolvida é apresentado na Figura 31.

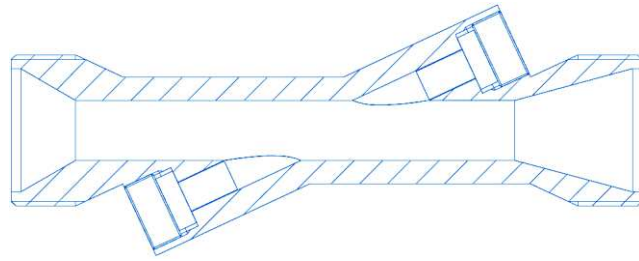


Figura 31 – Protótipo mecânico de referência.

Partindo-se do modelo de referência, o protótipo mecânico foi desenvolvido e suas referências métricas são apresentadas na Figura 32.

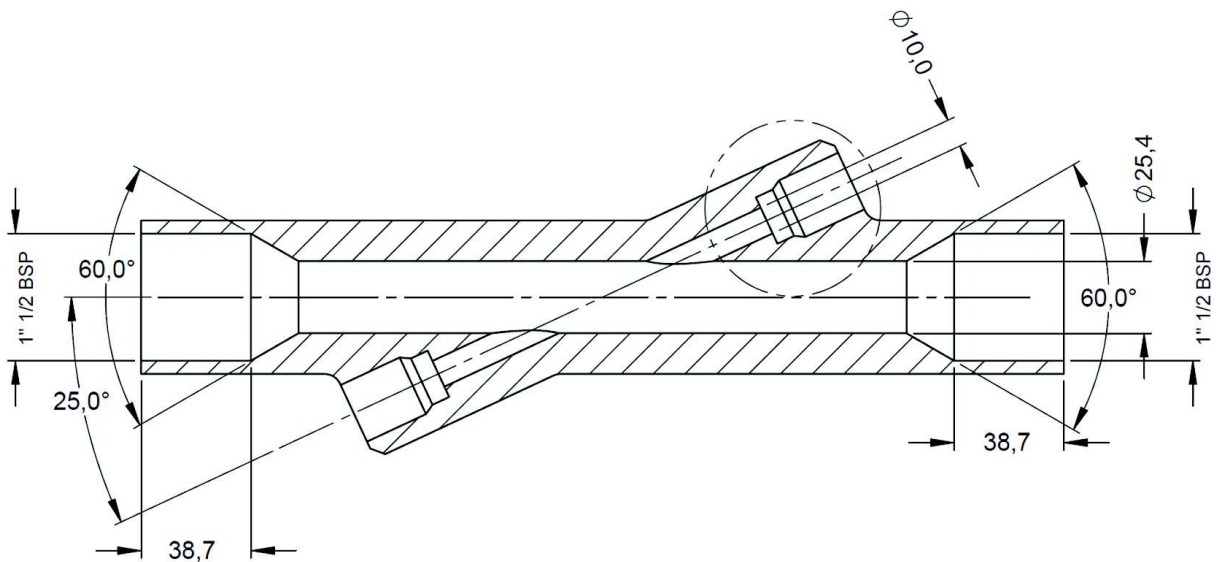


Figura 32 – Projeto mecânico com referências métricas.

O protótipo mecânico desenvolvido foi confeccionado por usinagem em alumínio. A Figura 33 apresenta a solução mecânica confeccionada.

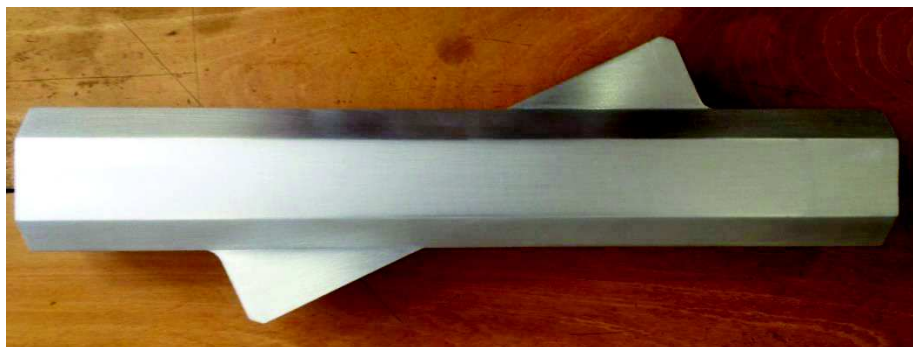


Figura 33 – Protótipo mecânico desenvolvido.

A distância final entre as faces dos dois transdutores, após a devida acomodação destes na estrutura mecânica desenvolvida, definida no modelo teórico apresentado na Figura 7 como L_w , foi de aproximadamente 60 mm. Esta distância está abaixo do mínimo recomendado para o método estudado, porém as medições puderam ser realizadas sem impactos aos objetivos estabelecidos.

A solução mecânica apresentou reduzida interferência no fluxo de água, não promovendo turbulência considerável. A perda de carga também se mostrou reduzida e o comportamento foi satisfatório. A conexão dos transdutores direta com a estrutura base provocou ressonância na estrutura, conforme previsto, sendo que os sinais transmitidos e recebidos pelos sensores 1 e 2 se misturaram e as medidas ficaram impossibilitadas.

A solução para esse contratempo foi dada pela utilização de anéis de borracha, que além de realizar a vedação com excelência, serviu como amortecedor e isolante para a vibração ultrassônica proveniente dos transdutores.

3.5 Desenvolvimento eletrônico

O circuito eletrônico que será apresentado a seguir, foi concebido com base na medição do tempo de trânsito desenvolvido pelos pulsos ultrassônicos enviados e recebidos pelos transdutores ultrassônicos. Em sua organização foram utilizadas técnicas analógicas e digitais para condicionamento, processamento e análise dos sinais de interesse.

Os níveis dos sinais trabalhados foram limitados em valores que permitissem a eficaz medição sem exposição desnecessária a ruídos e grandezas de interferência. A utilização de filtros, analógicos e digitais, foi suficiente para garantir uma boa qualidade dos sinais e a precisão das medidas realizadas.

Toda a montagem foi realizada, na sua maior parte, utilizando tecnologia discreta, pretendendo-se posteriormente migrar para SMT (*souface mount technology*). Entre as diversas vantagens dessa tecnologia, pode-se destacar diminuição de ruídos, menores tempos de retardo, maior resposta em frequência e menor interferência eletromagnética.

Depois de concluído o estudo dos principais fabricantes de medidores e transdutores ultrassônicos para medição da vazão, foi possível especificar um modelo de tecnologia a ser utilizado para medição e análise dos sinais provenientes desse método de medida.

O diagrama de blocos apresentado na Figura 19, apresentada todas as partes do circuito eletrônico responsável por condicionar os sinais entregues e recebidos dos transdutores ultrassônicos e será detalhado daqui em diante.

A fonte de alimentação que fornece toda a energia necessária para o funcionamento do circuito eletrônico recebe em sua entrada o sinal da rede elétrica alternada, podendo ser de 90 a 260 Vac, 50 ou 60 Hz. A tensão da rede é convertida para contínua e limitada em 24 Vdc e depois as tensões adequadas para cada parte do sistema são fornecidas, a fim de garantir o perfeito funcionamento de todos os circuitos. As tensões disponibilizadas internamente para alimentação do circuito são 3,3 Vdc para o microcontrolador, 5 Vdc para os circuitos de condicionamento e 8 Vdc para excitação dos transdutores. A estrutura fundamental da fonte é um regulador integrado da Texas Instruments, LM2594, ajustado para 8 Vdc, sendo os demais níveis de tensões ajustados a partir desse. A Figura 34 apresenta a configuração da fonte de alimentação.

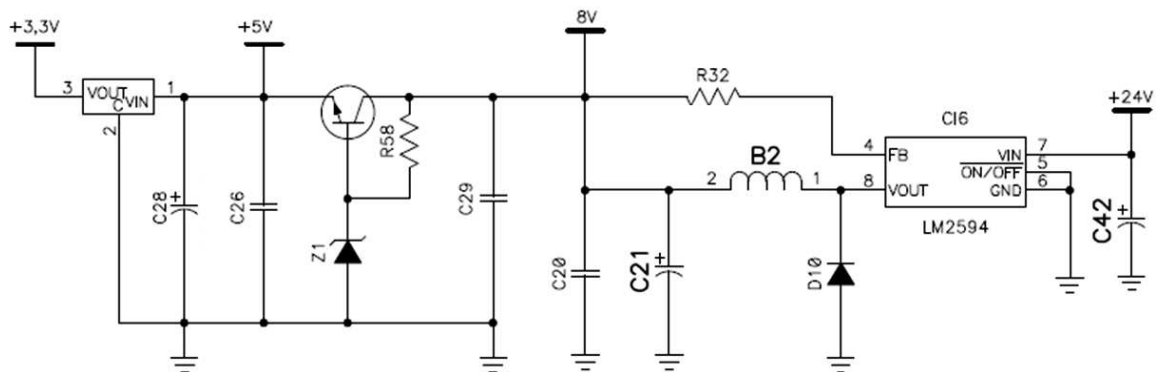


Figura 34 – Circuito para fornecimento de energia.

Os transdutores utilizados são os D-Flow de 4 MHz especificados no item 3.3. Sua aplicação será através de contato direto com o fluido utilizando o método intrusivo.

Os transformadores utilizados para elevar o nível de tensão de excitação fornecida pelo microcontrolador, utilizam núcleos com modelo planar, sendo fornecidos pelo fabricante Epcos sob o *part number* ER9,5/5 N97. O núcleo utilizado foi escolhido em função de suas características elétricas/magnéticas e dimensões.

Os drivers que elevam o potencial do sinal entregue pelo microcontrolador para realizar a excitação dos transformadores, fazem o chaveamento do sinal diretamente através de uma topologia clássica com transistores PNP. Nessa topologia, um transistor de menor potência recebe o sinal do microcontrolador e excita um transistor de maior potência que entrega o sinal

com energia adequada ao transformador. A Figura 35 apresenta a topologia utilizada com transistores PNP.

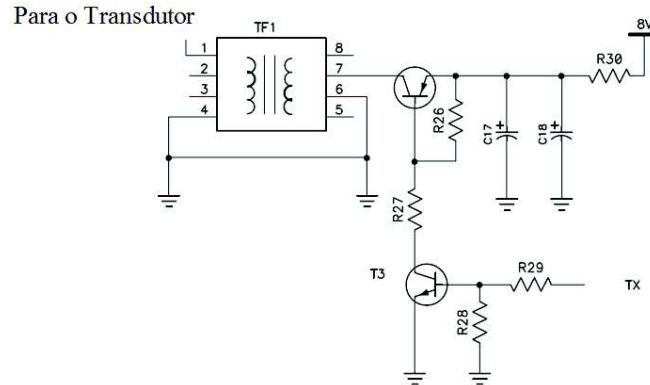


Figura 35 – Driver de potência para excitação dos transdutores.

Os ceifadores recebem os sinais do transdutor, transmissão em maior amplitude e recepção em menor amplitude, e faz com que ambos assumam níveis equivalentes e compatíveis com o estágio de amplificação. O fato de cortar e depois amplificar soa estranho, mas isso é necessário para a obtenção de sinais de mesma grandeza com a menor quantidade possível de sinais de interferência. Este circuito é composto por diodos que limitam a amplitude dos sinais. O componente escolhido para simplificação dessa etapa foi o BAV99 que opera com tempo de recuperação reversa (t_{rr}) na ordem de 4 ns. A Figura 36 mostra a configuração final dos ceifadores.

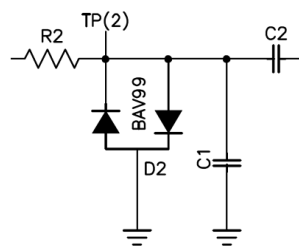


Figura 36 – Circuito ceifador com BAV99.

Os amplificadores cuidam para que os sinais entregues pelos ceifadores, transmissão e recepção, sejam amplificados para serem filtrados no estágio seguinte. Nessa etapa, devido aos reduzidos níveis, optou-se por uma solução baseada na eletrônica analógica, com a utilização de transistores em topologias amplificadoras. No primeiro estágio, tem-se um divisor de tensão

conectado à base do transistor NPN. O primeiro transistor é acionado e este aciona o transistor PNP até que a tensão de emissor inicia o seu desligamento. Busca-se o equilíbrio de tal forma que um aumento mínimo na entrada produzirá uma grande mudança na saída e esta será refletida de volta para o emissor do primeiro transistor para anular a voltagem de entrada. O último estágio utiliza uma configuração *Darlington*. Com essa modalidade de utilização de transistores, o dispositivo se torna capaz de proporcionar um grande ganho de corrente (h_{FE} ou parâmetro β do transistor). O Ganho total da estrutura *Darlington* é produto do ganho dos transistores individuais. Se comparado a um transistor comum, apresenta uma maior defasagem em altas frequências, por isso pode tornar-se facilmente instável. No circuito aplicado, a estabilidade permaneceu em excelentes níveis, não comprometendo nenhuma das medidas realizadas. A Figura 37 mostra a organização da eletrônica analógica para obterem-se os ganhos necessários.

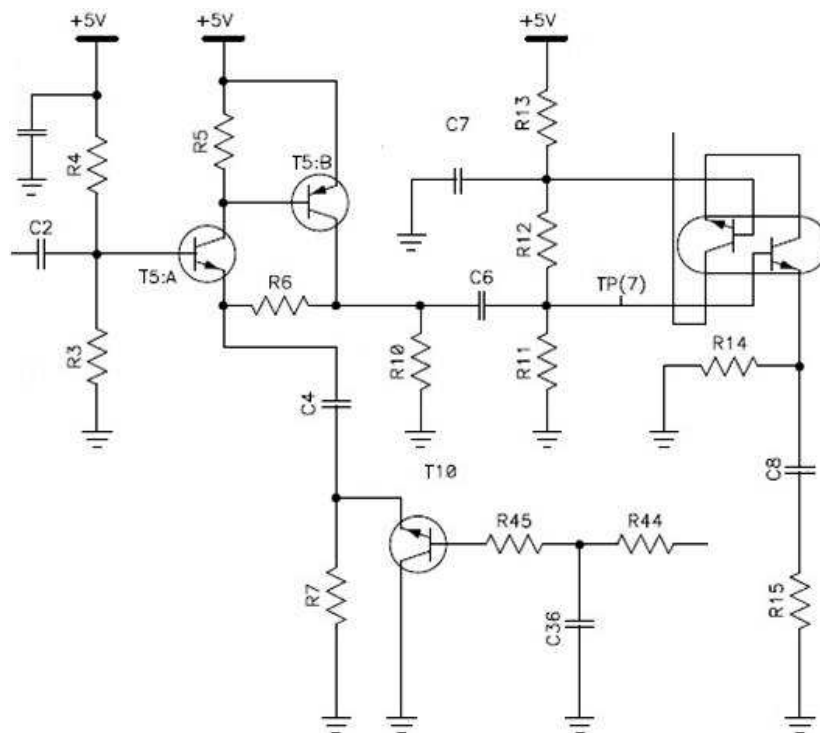


Figura 37 – Estágio de amplificação com transistores.

Os filtros são utilizados para eliminar as grandezas de interferência. Os filtros são ajustados na mesma frequência de excitação do transdutor, a fim de permitir a continuidade apenas do sinal de interesse e realizar a retenção de todas as componentes indesejáveis. A Figura 38 mostra a estrutura básica dos filtros utilizados.

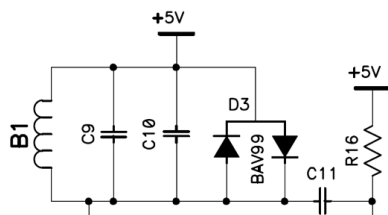


Figura 38 – Estágio de filtragem.

Os comparadores realizam a comparação do sinal entregue pelo filtro com um sinal padrão, tornando-o de fácil leitura pelo circuito microcontrolador. Com base nos sinais recebidos, transmissão e recepção, o comparador entrega em sua saída duas janelas proporcionais sem a presença do sinal ultrassônico, facilitando assim a leitura do tempo de trânsito. O circuito integrado, com funções de comparador, utilizado foi o LF356 e a estrutura final pode ser visualizada na Figura 39.

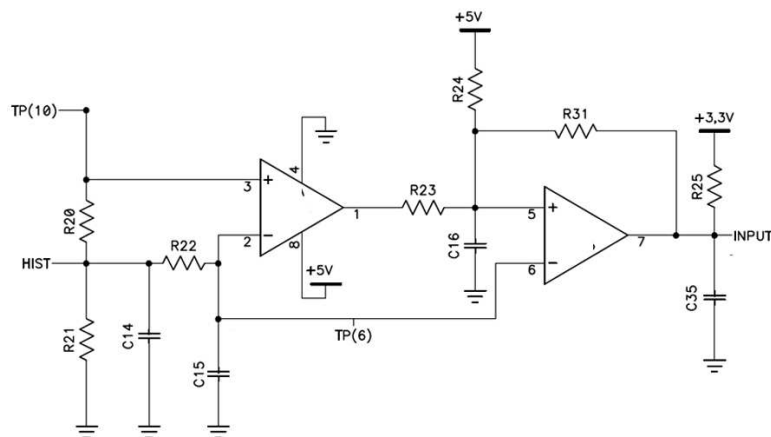


Figura 39 – Estágio de comparação.

O microcontrolador utilizado é o modelo DSPIC33FJ12 do fabricante Microchip. Baseado em núcleos de moderna geração, este dispositivo, a 40 MIPS, introduz maior capacidade de memória e integração comparativamente aos processadores com núcleos da anterior geração. Incluem 256 kB de memória Flash, 30 kB de RAM, maior capacidade de entradas/saída (E/S), com encapsulamento de 24 pinos, uma interface USB 2.0 e capacidades expandidas de controle de motores, gráficas, áudio, controle embarcado em tempo real, 6 canais analógicos e 4 PWM. O microcontrolador é o dispositivo responsável por receber todas as informações produzidas e medidas, analisá-las e entregar valores utilizáveis para os circuitos de saída. Com base nas informações entregues por ele, torna-se possível determinar o tempo de

trânsito nas condições testadas e definir a vazão correspondente. Em função da capacidade do microcontrolador escolhido, o estágio de integração que fornecerá em sua saída um sinal analógico proporcional às medições de tempo de trânsito e, conseqüentemente, a vazão pode ser implementada. O circuito que auxilia o microcontrolador em sua tarefa pode ser visto na Figura 40.

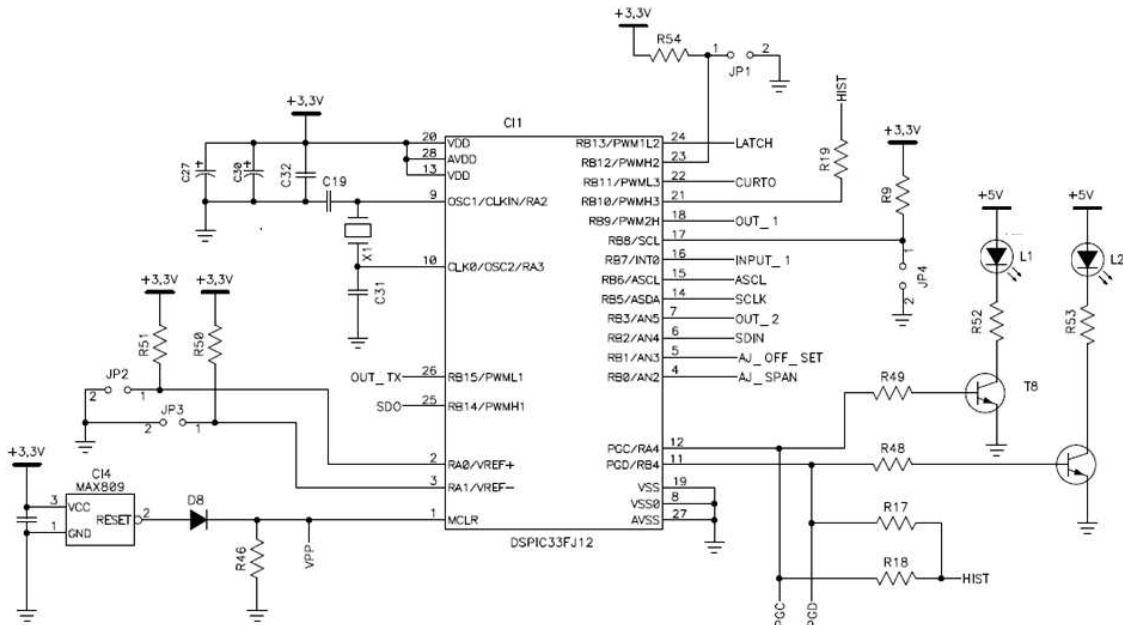


Figura 40 – Circuito microcontrolador e seus periféricos.

O cristal X1, através de sua frequência de oscilação, determina a base de tempo para execução do programa.

O circuito integrado MAX809 realiza a função de *power on reset*. Quando se energiza um equipamento eletrônico digital, não é possível prever o estado lógico dos circuitos internos. Para que não ocorra um acionamento indevido, esse circuito se encarrega de manter desligadas as saídas no instante em que se energiza o equipamento. Assim que o microprocessador assume o controle do equipamento esse circuito é desabilitado.

Os LEDs 1 e 2 de sinalização indicam o sentido do escoamento na tubulação.

A lógica desenvolvida em linguagem C foi gravada no microcontrolador e segue a seguinte estrutura básica: A janela de transmissão é gerada pelo microcontrolador e enviada para o circuito de potência do primeiro transdutor; no mesmo instante que a transmissão é disparada, inicia-se a contagem de tempo através de um temporizador; a partir desse momento, o microcontrolador monitora a linha de retorno do segundo transdutor aguardando a entrega do

sinal transmitido; a chegada do sinal encerra a temporização e o valor é armazenado; um novo disparo de transmissão acontece para o segundo transmissor e todo o processo se repete; os dois resultados são comparados e um sinal proporcional é enviado ao circuito de integração; do mesmo modo o microcontrolador cria uma janela de tempo proporcional aos temporizados que medem o tempo de trânsito para permitir a monitoração externa. Além desses sistemas, filtros digitais e sistemas de *startup* foram implementados na lógica programada. O fluxograma base para medição do tempo de trânsito e definição da vazão está apresentado na Figura 41.



Figura 41 – Fluxograma básico para medição da vazão baseado no tempo de trânsito com sinal ultrassônico.

O circuito integrador de saída realiza a transformação da informação digital enviada pelo microcontrolador para um sinal analógico, entregando em sua saída um sinal em corrente de 4 a 20 mA, atendendo um padrão industrial internacional. A base desse estágio é o conversor A/D (analógico/digital) AD5412, que apresenta baixo custo, ótima precisão, totalmente integrado com conversão em 12 bits e saída configurável para padrões em corrente. A faixa de corrente de saída pode ser programada para operar de 4 mA a 20 mA, 0 mA a 20 mA, ou em uma função *overrange* de 0 mA a 24 mA. O padrão de corrente escolhido foi o de 4 mA a 20 mA, pois é o padrão mais utilizado pelas indústrias e estima-se que nos melhores casos, pode-se alcançar distâncias de aproximadamente 1 km sem prejuízo da informação. Esse sinal de corrente se apresentou proporcional a vazão em toda a sua faixa de sensibilidade. O circuito básico desse estágio pode ser visualizado na Figura 42.

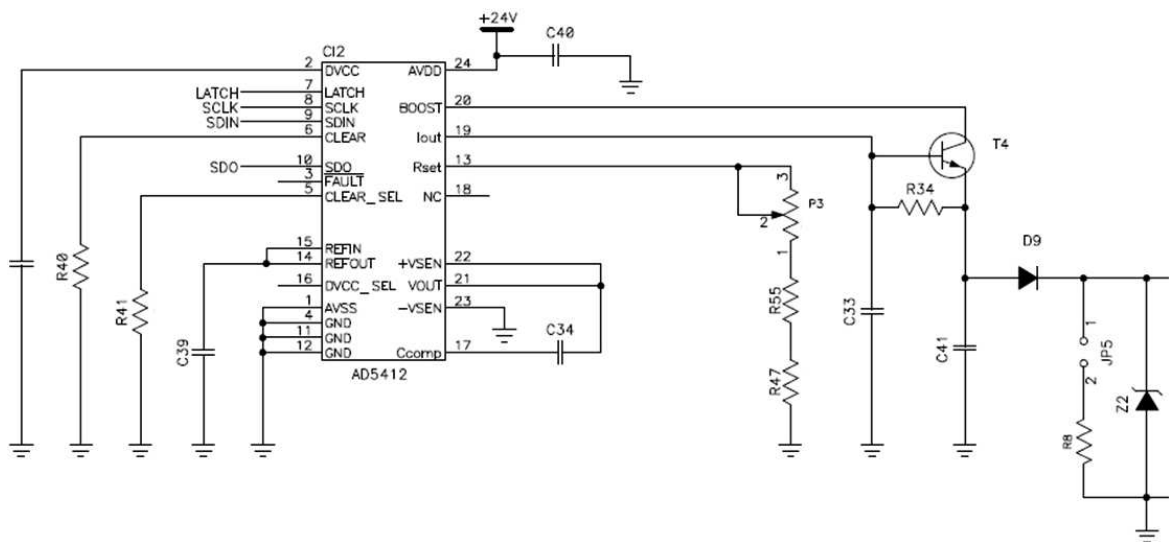


Figura 42 – Circuito integrador de saída.

3.6 Desenvolvimento da planta de testes

Para testes e validação da teoria estudada e dos protótipos desenvolvidos foi necessário a montagem de uma planta hidráulica controlada para testes. A ideia base para a planta utilizada para promover a vazão controlada e referenciada é apresentada na Figura 43.

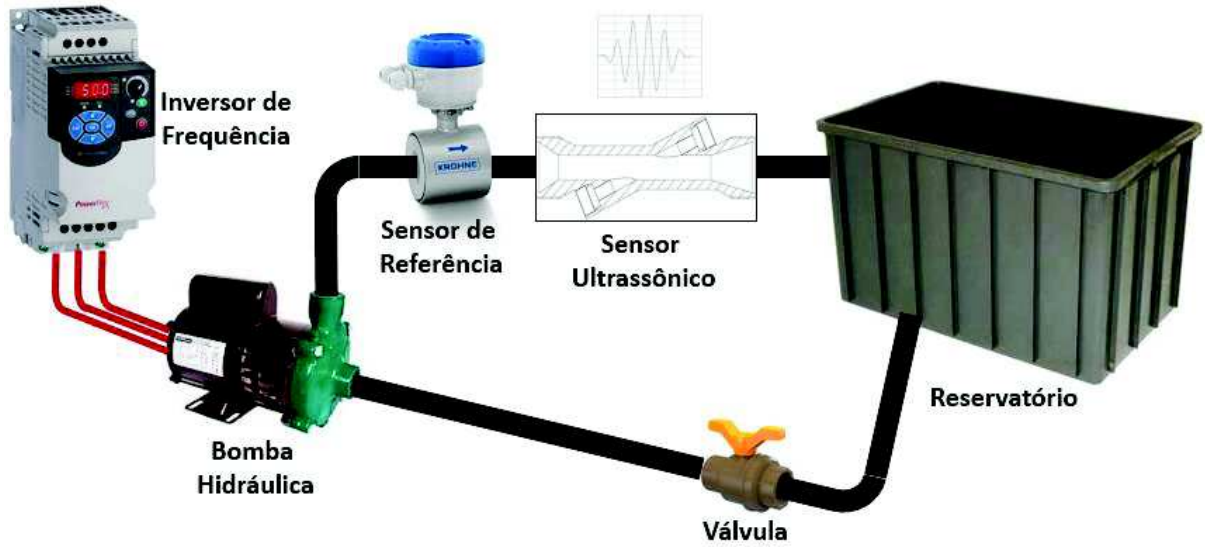


Figura 43 – Proposta para planta de testes.

Para isso, optou-se em utilizar uma bomba hidráulica de 3 cv de potência, modelo ECS-300T do fabricante Eletroplas, e um inversor de frequência, modelo PowerFlex 4M, do fabricante Allen-Bradley. A proposta foi utilizar o inversor de frequências para promover a variação da frequência da rede alternada que alimenta a bomba hidráulica e, conseqüentemente, controlar a vazão produzida por ela.

A Figura 44 ilustra a planta hidráulica desenvolvida para os testes necessários para esse trabalho.



Figura 44 – Setup de testes para validação do protótipo desenvolvido.

Observa-se no percurso da tubulação que houve atenção para atender as recomendações sobre curvas e trechos retos que garantem a utilização do sensor de referência OPTIFLUX 1000 [25]. Como resultado final, após preenchida toda a tubulação com água, foi possível controlar a vazão em uma faixa de 0 até 5 l/s, equivalente a uma velocidade de escoamento do fluido pela tubulação de 2 polegadas em uma faixa de 0 até, aproximadamente, 2,5 m/s (2,47 m/s) e no interior do protótipo mecânico, onde o diâmetro é de apenas 1 polegada, de 0 até, aproximadamente, 10 m/s (9,87 m/s).

O fluido utilizado nos testes foi água pura a temperatura ambiente. A tubulação utilizada é de PVC e possui 2 polegadas de diâmetro, padrão hidráulico. Uma válvula registro foi instalada para garantir o fechamento total do sistema para manutenção. O medidor OPTIFLUX 1000 em conjunto com o conversor de sinais IFC 050 fornece a referência da vazão para análise dos resultados. Sendo o foco deste trabalho a percepção, condicionamento e análise dos sinais provenientes de sensores ultrassônicos para medição de vazão baseado em tempo de trânsito, o erro do medidor de referência será considerado nulo.

Os resultados registrados foram medidos em tempo através de osciloscópio, diretamente no circuito desenvolvido, através da corrente na saída do circuito, com a utilização do amperímetro, e através do microcontrolador, após implementado no circuito de condicionamento.

3.7 Testes e resultados

O sinal ultrassônico utilizado no sistema de medida, conforme definido no item 3.3, tem uma janela de transmissão de 5,25 μ s, com frequência de 4 MHz, sendo transmitido em cada janela 21 ciclos.

O sistema de medição passou por uma calibração de “zero “ e “fundo de escala”, onde zero significa o menor valor medido e fundo de escala o maior valor medido, limitando sua atuação para vazões de 0 a 18 m³/h (5 l/s), correspondente a uma velocidade de vazão igual a 0 e 2,47 m/s, conforme definido no item 3.6. O sinal de saída, portanto, terá sua variação de 4 a 20 mA proporcional a essa faixa de medidas.

Antes de iniciar a apresentação dos resultados, é de grande valia registrar as imagens que mostram o comportamento do sinal ultrassônico no circuito desenvolvido, elucidando, assim, sua eficácia frente aos objetivos estabelecidos. Os sinais mostram todo o trabalho de um lado do transdutor e vale como referência para ambos os lados. Os sinais mostram todo o

percurso do sinal, em momentos diferentes, desde sua geração até a produção do sinal analógico proporcional à vazão.

Os pontos de medição foram indicados no diagrama de blocos da Figura 19 para facilitar sua localização no processo de medida, sendo eles:

A – Sinal de excitação entregue pelo microcontrolador: a Figura 45 apresenta o sinal gerado pelo microcontrolador contendo 21 ciclos em $5,25 \mu\text{s}$, com frequência de 4 MHz.

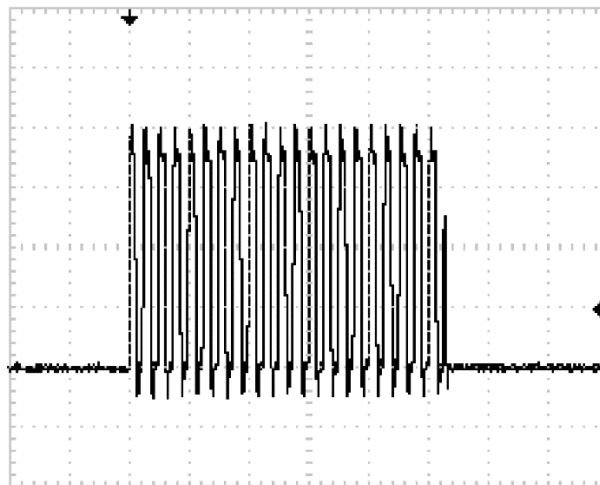


Figura 45 – Sinal de excitação entregue pelo microcontrolador.

B – Sinal de transmissão aplicado ao transdutor: a Figura 46 mostra o sinal de transmissão presente no transdutor, após condicionado para suas características operacionais. Pode-se observar a deformação do sinal produzido inicialmente pelo microcontrolador, devido ao comportamento dos semicondutores de chaveamento e do transdutor.

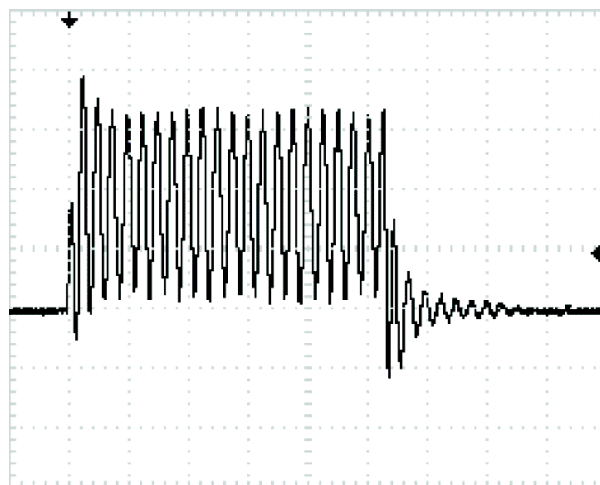


Figura 46 – Sinal de transmissão aplicado ao transdutor.

C – Sinais de transmissão e recepção no transdutor: a Figura 47 mostra os sinais de transmissão e recepção entregues pelo transdutor. O sinal de recepção, após percorrer seu caminho apresenta considerável atenuação. A variação de sua amplitude depende do meio onde se propagou e da distância percorrida.

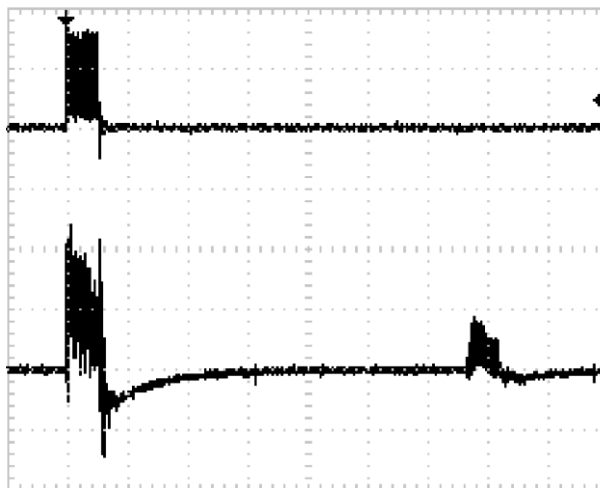


Figura 47 – Sinais de transmissão e recepção no transdutor.

D – Sinais de transmissão e recepção equalizados em nível: a Figura 48 mostra os sinais de transmissão e recepção ceifados para terem a mesma ordem de amplitude. Nessa imagem, pode-se observar a diferença de tempos entre transmissão e recepção.

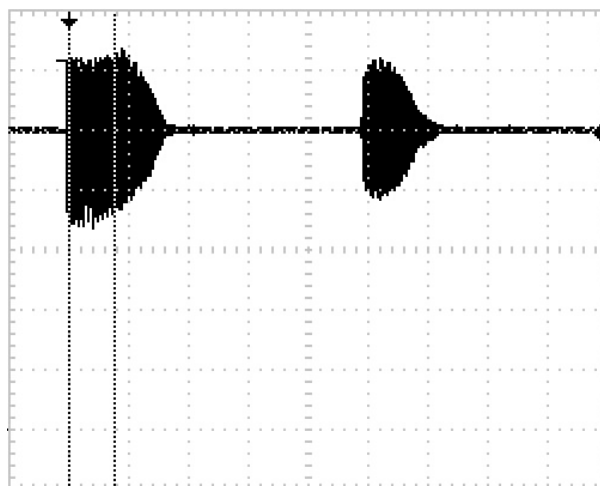


Figura 48 – Sinais de transmissão e recepção equalizados em nível.

E – Sinais de transmissão e recepção amplificados: a Figura 48 mostra os sinais de transmissão e recepção amplificados após serem ceifados. Nessa imagem, mesmo após amplificados, observa-se a mesma ordem de grandeza nos dois sinais. Pode-se, também, observar o sinal da Figura 49 que representa a contagem do tempo pelo microcontrolador.

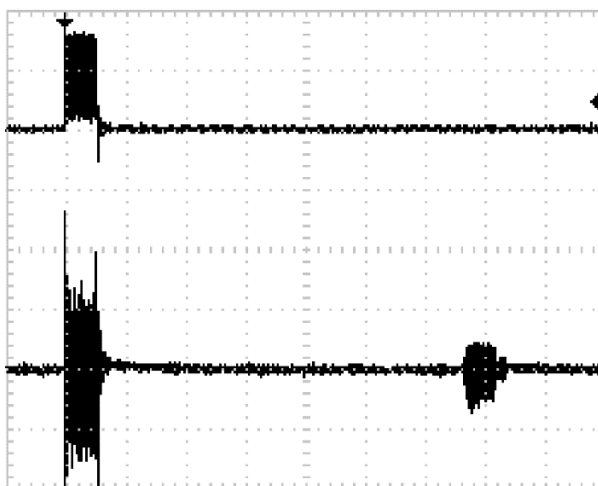


Figura 49 – Sinais de transmissão e recepção amplificados.

F – Sinais de transmissão e recepção filtrados: a Figura 50 mostra os sinais de transmissão e recepção após passarem pelo filtro. Após a filtragem, pode-se observar uma forte redução dos sinais de interferência.

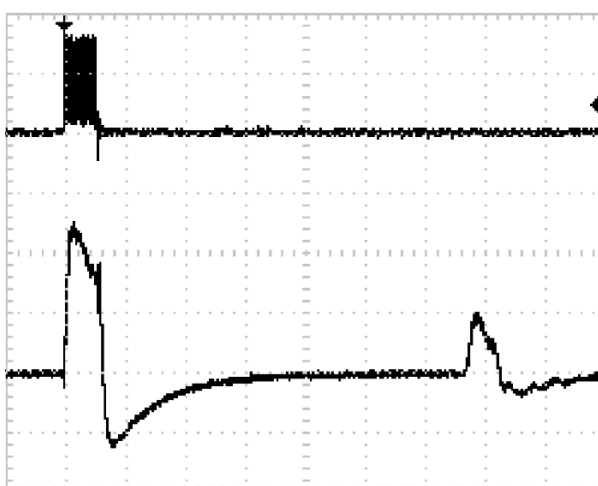


Figura 50 – Sinais de transmissão e recepção filtrados.

G – Sinais de transmissão e recepção convertidos em janelas únicas para medição do tempo de trânsito: Na Figura 51 pode-se verificar os sinais entregues na saída dos comparadores, onde o sinal ultrassônico é retirado e somente a janela é enviada para leitura do microcontrolador.

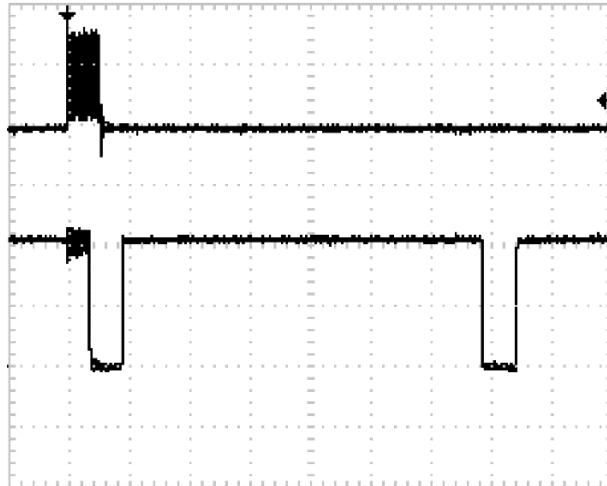


Figura 51 – Sinais de transmissão e recepção convertidos em janelas únicas para medição do tempo de trânsito.

H – Sinal analógico disponibilizado na saída proporcional a vazão medida: A Figura 52 apresenta o sinal analógico disponibilizado na saída do integrador. Pode-se verificar que o sinal analógico, proporcional ao tempo de trânsito, disponibilizado na saída do integrador está livre de interferências.

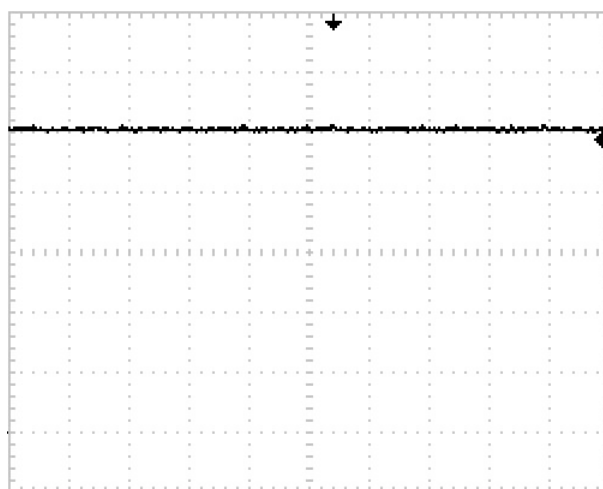


Figura 52 – Sinal analógico disponibilizado na saída proporcional a vazão medida.

Alguns momentos de instabilidade foram observados no início dos testes, mas todos estavam relacionados com a solução mecânica utilizada. Qualquer interferência física (obstáculo, curvas, entre outros) aplicada no percurso adotado pelo fluido para sua vazão provoca turbulência. Os volumes de vazão e as condições de teste precisaram ser protegidos para obter-se uma condição homogênea durante todo o processo. O circuito eletrônico por sua vez, após finalizado, apresentou interferências nas leituras que foram identificadas como sendo provenientes do inversor de frequências. Ao inserir os filtros e cuidados básicos para a correta utilização do sistema, o circuito não apresentou dificuldades ou imprevistos devido à possibilidade de calibração no início de cada jornada de testes.

Observou-se, então, a possibilidade de simplificação do circuito utilizado, a fim de oferecer uma solução simplificada para fins acadêmicos e didáticos. Após a análise do desempenho de cada parte do circuito, identificou-se que o transdutor pode ser excitado diretamente pelo microcontrolador, pois a propagação na água e a reduzida distância permitem trabalhar com uma reduzida potência de transmissão. O fato de eliminar o transformador e o circuito de chaveamento, eliminou também uma possível fonte de ruídos. O microcontrolador pôde ser substituído por uma solução de menor custo, a plataforma MPS430 do fabricante *Texas Instruments*. Além disso, os circuitos de filtragem puderam ser simplificados, reduzindo o número de componentes. A Figura 53 ilustra os estágios de filtragem e amplificação já em sua versão simplificada.

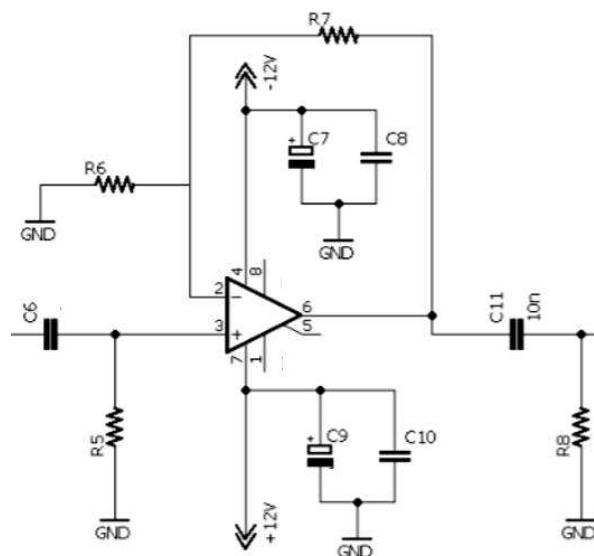


Figura 53 – Estágios de filtragem e amplificação simplificados.

Depois de concluída a construção da planta necessária para realização dos testes e finalizado o circuito eletrônico que possibilita a medição e a análise dos sinais, foram realizados os testes e levantadas as características de maior interesse para o objetivo desse trabalho. Os resultados e a análise desses resultados estão apresentados no capítulo 4.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

O objetivo dessa fase está na medição da variação do tempo de trânsito promovida pela variação da vazão do fluido na tubulação estudada. Algumas características foram levantadas e contribuirão para a análise dos resultados. Adicionalmente, foi medida e analisada a saída analógica de corrente implementada no sistema, a fim de contribuir com a confiabilidade dos resultados aqui apresentados.

Todas as medidas de tempo e corrente de saída foram realizadas utilizando um osciloscópio, modelo TDS1012, com 100 MHz e taxa de amostragem de 1 GS/s, e um multímetro, modelo DMM4020, com precisão de 5.5 dígitos e resolução de 0.015 %, ambos do fabricante Tektronix.

Uma vez que a planta de teste se mostrou estável e com tolerância desprezível, considerou-se nos testes e avaliação prática o coeficiente hidráulico de correção k_h igual a 1.

Para caracterização e avaliação do sistema desenvolvido, serão utilizadas algumas características específicas, ficando as demais desconsideradas. Como o objetivo do trabalho é possibilitar a medida e o processamento dos sinais proveniente de medidores de vazão baseado em tempos de trânsito de sinais ultrassônicos, serão analisadas as seguintes características: precisão, sensibilidade, linearidade, exatidão e erros.

Em um primeiro momento, buscou-se o levantamento da precisão com base em medidas realizadas com o fluido estático. A precisão caracteriza a dispersão das respostas de um sensor ou sistema, independentemente do erro entre o valor medido e o real, quando submetido ao mesmo estímulo e sobre condições idênticas. Para um conjunto N de medidas de uma dada quantidade, a precisão de um sensor ou sistema pode ser quantificada estatisticamente pelo desvio padrão. A equação 40 apresenta a forma básica de se obter o desvio padrão a partir de N medidas.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (s_i - \bar{s})^2}{N - 1}} \quad (40)$$

Onde:

σ é o desvio padrão;

N é o número de medidas realizadas;

s_i é o valor medido no momento;

\bar{s} é o valor médio das medidas realizadas.

Como é impossível fazer todas as medidas do universo de medidas para se determinar a sua média, o procedimento adotado será, a partir das N observações, por meio de considerações de ordem estatística, obter a melhor estimativa para o desvio padrão. Com o fluido parado, ou seja, com vazão nula e invariável no tempo, foi realizada uma bateria de dez medidas em momentos distintos para determinação do desvio padrão do sensor, permitindo, assim, visualizar sua precisão. Todos os cuidados necessários para conservar as condições de testes inalteradas foram tomados. As medidas realizadas foram o tempo de trânsito diretamente da placa, precisamente nos terminais do microcontrolador e a corrente de saída, que deverá ser proporcional à vazão monitorada. A Tabela 4 apresenta o resultado dessas medidas.

Tabela 4 – Medidas de tempo de trânsito e sinal analógico de saída com vazão nula.

Tempo de trânsito (μs)	Corrente de Saída (mA)
40,7	4,00
40,6	4,00
40,6	4,00
40,6	4,00
40,6	4,01
40,6	4,00
40,6	4,00
40,6	4,00
40,6	4,00
40,6	3,99
40,6	4,00

Com base nos resultados da Tabela 4, onde foram realizadas medidas do tempo de trânsito e da corrente analógica de saída. É possível verificar que o desvio padrão do tempo de trânsito foi igual a 0,0316 e o desvio padrão da corrente de saída foi igual a 0,0047. O significado do desvio padrão é que ele indica o erro que se teria caso fosse feita uma única medida. Desta forma, as variações não podem ser consideradas padronizadas, mas, baseado nisso, a precisão atendeu as expectativas da proposta.

Para determinação de outras características, linearidade, sensibilidade, exatidão e erros, foram realizadas novas medidas variando gradualmente a vazão pelo sistema. Nessa etapa,

tomou-se o cuidado de aperfeiçoar os passos de alteração de vazão. Porém, pequenas imprecisões necessitaram ser aceitas. Por ter sido utilizada uma válvula de comando manual, mesmo com a utilização do medidor de referência, considera-se a possibilidade de erro por falha humana, mas essa será desconsiderada.

As vazões foram promovidas inicialmente no sentido do transdutor 1 para o transdutor 2 e os resultados estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Resultados com escoamento no sentido do transdutor 1 para o transdutor 2.

Vazão OPTIPFLUX 1000 + IFC 050 (l/s)	Tempo de Trânsito t_{12} (μ s)	Tempo de Trânsito t_{21} (μ s)	Relação $\frac{t_{21}-t_{12}}{t_{21}t_{12}}$ (s ⁻¹)	Corrente de Saída (mA)
0,00	40,60	40,60	0,00	4,002
0,25	40,59	40,61	12,13	4,801
0,51	40,58	40,63	30,33	5,598
0,76	40,57	40,64	42,46	6,410
1,01	40,56	40,66	60,64	7,199
1,27	40,55	40,67	72,76	7,997
1,52	40,54	40,69	90,93	8,800
1,77	40,53	40,70	103,06	9,611
2,03	40,51	40,71	121,27	10,399
2,28	40,50	40,72	133,40	11,200
2,53	40,48	40,73	151,63	12,005
2,79	40,47	40,74	163,76	12,810
3,04	40,46	40,76	181,91	13,598
3,29	40,45	40,77	194,04	14,395
3,55	40,43	40,78	212,28	15,206
3,80	40,42	40,79	224,41	16,000
4,05	40,41	40,81	242,55	16,815
4,31	40,40	40,82	254,68	17,612
4,56	40,38	40,83	272,94	18,402
4,81	40,37	40,84	285,07	19,199
5,07	40,36	40,86	303,19	19,998

As informações da Tabela 5 podem ser mais bem visualizadas de maneira gráfica. As Figuras 54 e 55 apresentam a representação gráfica dos resultados obtidos pela diferença entre os tempos promovidos e em função do sinal analógico de saída.

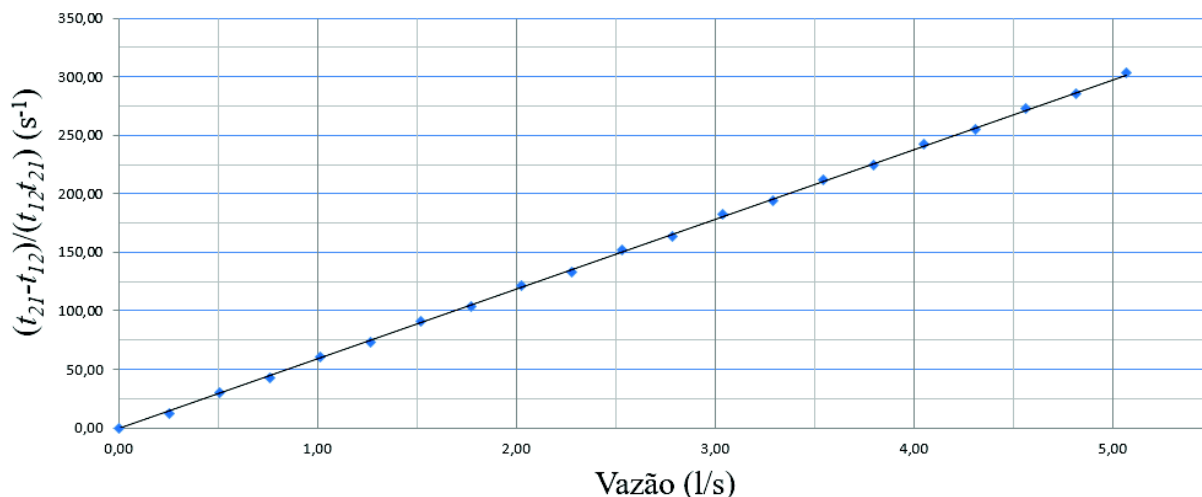


Figura 54 – Gráfico com a relação da vazão de 1 para 2 pela relação $\frac{t_{21}-t_{12}}{t_{21}t_{12}}$.

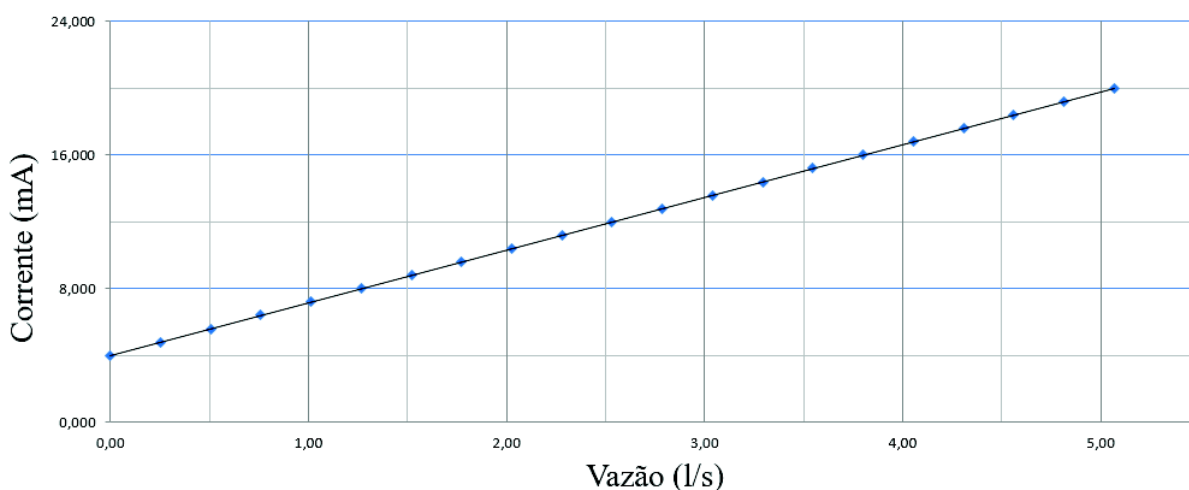


Figura 55 – Gráfico com a relação da vazão de 1 para 2 pela corrente de saída no padrão de 4 a 20mA.

Pode-se definir a sensibilidade do sensor ou do sistema, como sendo a variação do sinal de saída promovida por uma unidade de variação da grandeza de entrada. Com base nisso, foram determinadas duas sensibilidades, uma com base na diferença entre os tempos de trânsito e outra pela variação do sinal de corrente presente em sua saída. Como as grandezas de saída não apresentaram comportamentos lineares em toda a sua faixa de ação, será considerado a média da variação da saída para a variação de uma unidade da grandeza de entrada para se definir a sensibilidade.

A sensibilidade média para esse caso, considerando-se a diferença entre os tempos de trânsito em função da vazão, foi igual a 100 ns/l/s. Considerando a relação $\frac{t_{21}-t_{12}}{t_{21}t_{12}}$, a sensibilidade é dada como sendo 60,638 s⁻¹/l/s.

A sensibilidade média, considerando-se o valor do sinal analógico de corrente presente na saída em função da vazão, foi igual a 3,1992 mA/l/s.

Com base no comportamento dos gráficos das Figuras 54 e 55, pode-se, de maneira equivocada, considerar que o erro de linearidade é desprezível, podendo assim ser o medidor desenvolvido considerado linear em toda a faixa de testes. Porém, essa modalidade de medidor apresenta erros bastante reduzidos, mesmo quando as medidas são realizadas com percurso único. Esse fato faz com que maiores investigações nos resultados sejam realizadas.

Os resultados obtidos foram lançados nos gráficos das Figuras 54 e 55 sendo adicionada a projeção de uma linha de tendência que indicará o resultado ideal que garante a linearidade em toda a faixa de ação.

Através dos resultados obtidos pela projeção feita, pode-se definir a resposta linear esperada do sistema e analisar o erro máximo obtido no processo de leitura. A Tabela 6 apresenta os valores esperados de vazão para cada medida realizada, considerando-se o sistema ideal e os erros percentuais das medições realizadas no sistema real desenvolvido.

Tabela 6 – Vazões ideais para as medidas realizadas para vazão de 1 para 2.

Tempo de Trânsito t_{12} (μ s)	Tempo de Trânsito t_{21} (μ s)	Relação $\frac{t_{21}-t_{12}}{t_{21}t_{12}}$ (s^{-1})	Vazão Produzida (l/s)	Erro da Relação $\frac{t_{21}-t_{12}}{t_{21}t_{12}}$ (s^{-1})	Erro da Vazão (l/s)
40,6091	40,6091	0,00	0,00	0,00	0,0000
40,5967	40,6216	15,08	0,25	2,95	0,0495
40,5843	40,6340	30,16	0,51	0,17	0,0028
40,5719	40,6465	45,24	0,76	2,78	0,0468
40,5595	40,6589	60,32	1,01	0,32	0,0053
40,5471	40,6714	75,40	1,27	2,63	0,0443
40,5347	40,6839	90,48	1,52	0,45	0,0076
40,5223	40,6964	105,56	1,77	2,50	0,0420
40,5099	40,7089	120,64	2,03	0,64	0,0107
40,4975	40,7213	135,72	2,28	2,32	0,0389
40,4852	40,7339	150,80	2,53	0,83	0,0140
40,4728	40,7464	165,88	2,79	2,12	0,0355
40,4605	40,7589	180,96	3,04	0,96	0,0161
40,4481	40,7714	196,03	3,29	2,00	0,0335
40,4358	40,7840	211,11	3,55	1,17	0,0196
40,4235	40,7965	226,19	3,80	1,78	0,0299
40,4112	40,8091	241,27	4,05	1,28	0,0215
40,3989	40,8216	256,35	4,31	1,67	0,0281
40,3866	40,8342	271,43	4,56	1,51	0,0253
40,3743	40,8468	286,51	4,81	1,44	0,0242
40,3620	40,8593	301,59	5,07	1,60	0,0269

Com base nos resultados apresentados pode-se verificar que os erros máximos verificados foram de $2,95 s^{-1}$ para a relação $\frac{t_{21}-t_{12}}{t_{21}t_{12}}$ e $0,05 l/s$ para a vazão (desconsiderado o ponto inicial calibrado em zero). O valor médio do erro do sistema, nessa condição, ficou em $0,977 \%$. Considerando-se que o erro médio da medição de vazão por transdutores ultrassônicos baseado em tempo de trânsito com percurso único é de, aproximadamente, 1% , vê-se que os resultados alcançados foram satisfatórios para o primeiro sentido de vazão.

O mesmo trabalho de medições foi realizado considerando a vazão no sentido contrário e os resultados foram novamente registrados. A Tabela 7 apresenta os resultados para vazões promovidas no sentido do sensor 2 para o sensor 1.

Tabela 7 – Resultados com escoamento no sentido do transdutor 2 para o transdutor 1.

Vazão OPTIPFLUX 1000 + IFC 050 (l/s)	Tempo de Trânsito t_{12} (μ s)	Tempo de Trânsito t_{21} (μ s)	Relação $\frac{t_{12}-t_{21}}{t_{12}t_{21}}$ (s ⁻¹)	Corrente de Saída (mA)
0,00	40,60	40,60	0,00	4,020
0,25	40,62	40,59	18,20	4,808
0,51	40,63	40,58	30,33	5,601
0,76	40,64	40,57	42,46	6,398
1,01	40,65	40,55	60,67	7,199
1,27	40,66	40,54	72,80	7,997
1,52	40,68	40,53	90,98	8,799
1,77	40,69	40,52	103,11	9,600
2,03	40,71	40,51	121,27	10,376
2,28	40,72	40,50	133,40	11,206
2,53	40,74	40,49	151,56	12,023
2,79	40,75	40,48	163,68	12,800
3,04	40,76	40,46	181,91	13,595
3,29	40,76	40,44	194,14	14,394
3,55	40,78	40,43	212,28	15,202
3,80	40,79	40,42	224,41	16,011
4,05	40,80	40,40	242,67	16,800
4,31	40,81	40,39	254,81	17,600
4,56	40,83	40,38	272,94	18,389
4,81	40,85	40,38	284,93	19,207
5,07	40,87	40,37	303,04	20,001

As informações da Tabela 7 podem ser mais bem visualizadas, assim como foi feito no primeiro caso, de maneira gráfica. As Figuras 56 e 57 apresentam a representação gráfica dos resultados obtidos pela diferença entre os tempos promovidos e em função do sinal analógico de saída para esse novo sentido de escoamento.

A diferença entre os dois sentidos de vazão pode ser percebida no protótipo desenvolvido para os testes através dos LEDs de sinalização, L1 e L2, conforme apresentado na Figura 40 do item 3.5.

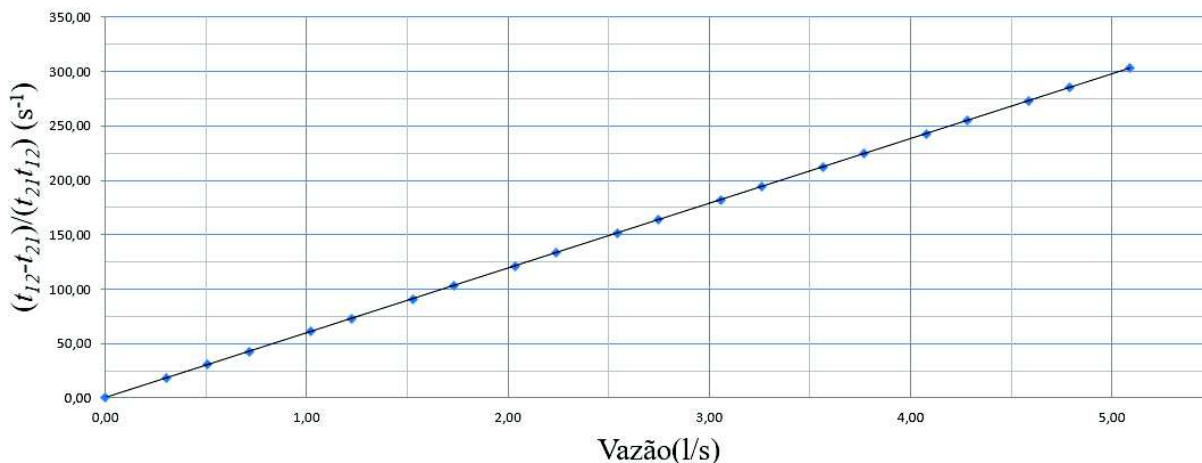


Figura 56 – Gráfico com a relação da vazão de 2 para 1 pela relação $\frac{t_{12}-t_{21}}{t_{12}t_{21}}$.

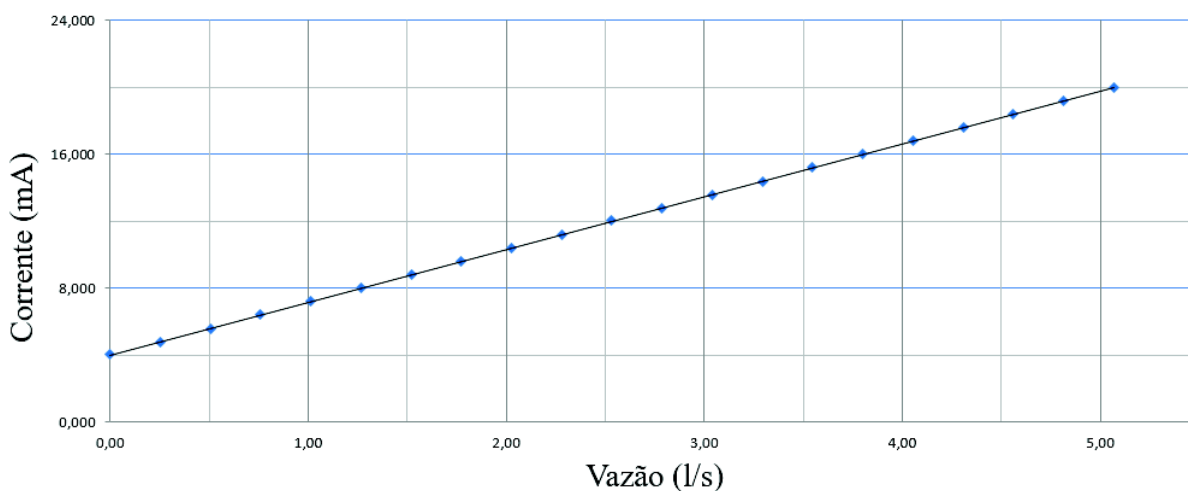


Figura 57 – Gráfico com a relação da vazão de 2 para 1 pela corrente de saída no padrão de 4 a 20mA.

Aplicando os mesmos conceitos utilizados na primeira situação analisada, pode-se determinar as sensibilidades para essa nova realidade.

A sensibilidade média para esse caso, considerando-se a diferença entre os tempos de trânsito em função da vazão, foi igual a 100 ns/l/s. Considerando a relação $\frac{t_{12}-t_{21}}{t_{12}t_{21}}$, a sensibilidade é dada como sendo 60,608 s⁻¹/l/s.

A sensibilidade média, considerando-se o valor do sinal analógico de corrente presente na saída em função da vazão, foi igual a 3,1962 mA/l/s.

Em função das mesmas razões apresentadas no caso anterior, os resultados obtidos foram lançados nos gráficos com a projeção de uma linha de tendência que indicará o resultado ideal que garante a linearidade em toda a faixa de ação.

Também como no caso anterior, através dos resultados obtidos pela projeção feita, pode-se definir a resposta linear esperada do sistema e analisar o erro máximo obtido no processo de leitura. A Tabela 8 apresenta os valores esperados de vazão para cada medida realizada, em relação ao sistema ideal.

Tabela 8 – Vazões ideais para as medidas realizadas para vazão de 2 para 1.

Tempo de Trânsito t_{12} (μ s)	Tempo de Trânsito t_{21} (μ s)	Relação $\frac{t_{12}-t_{21}}{t_{12}t_{21}}$ (s^{-1})	Vazão Produzida (l/s)	Erro da Relação $\frac{t_{12}-t_{21}}{t_{12}t_{21}}$ (s^{-1})	Erro da Vazão (l/s)
40,6091	40,6091	0,00	0,00	0,00	0,0000
40,6216	40,5967	15,08	0,25	3,12	0,0523
40,6340	40,5843	30,16	0,51	0,17	0,0028
40,6465	40,5719	45,24	0,76	2,78	0,0468
40,6589	40,5595	60,32	1,01	0,35	0,0058
40,6714	40,5471	75,40	1,27	2,60	0,0437
40,6839	40,5347	90,48	1,52	0,50	0,0084
40,6964	40,5223	105,56	1,77	2,45	0,0412
40,7089	40,5099	120,64	2,03	0,64	0,0107
40,7213	40,4975	135,72	2,28	2,32	0,0389
40,7339	40,4852	150,80	2,53	0,76	0,0128
40,7464	40,4728	165,88	2,79	2,20	0,0369
40,7589	40,4605	180,96	3,04	0,96	0,0161
40,7714	40,4481	196,03	3,29	1,90	0,0319
40,7840	40,4358	211,11	3,55	1,17	0,0196
40,7965	40,4235	226,19	3,80	1,78	0,0299
40,8091	40,4112	241,27	4,05	1,40	0,0235
40,8216	40,3989	256,35	4,31	1,55	0,0260
40,8342	40,3866	271,43	4,56	1,51	0,0253
40,8468	40,3743	286,51	4,81	1,58	0,0266
40,8593	40,3620	301,59	5,07	1,45	0,0244

Com base nos resultados apresentados, pode-se verificar que os erros máximos verificados foram de $3,12 s^{-1}$, para a relação $\frac{t_{12}-t_{21}}{t_{12}t_{21}}$, e 0,05 l/s, para a vazão (desconsiderado o ponto inicial calibrado em zero). O valor médio do erro do sistema nessa condição ficou em 1,033 %. Considerando-se que o erro médio da medição de vazão por transdutores ultrassônicos baseado em tempo de trânsito com percurso único é de, aproximadamente, 1 %, vê-se que os resultados alcançados foram satisfatórios também para o segundo sentido de vazão.

5 CONCLUSÕES

A medição de vazão é conhecidamente uma necessidade para processos industriais em diversas linhas de atuação. A confiabilidade e a estabilidade dos sistemas de medidas são fundamentais para a segurança dos processos e qualidade dos produtos. Existem diversos fabricantes que fornecem soluções para a medição dessa grandeza física. Porém, a quantidade de opções, em alguns casos, pode dificultar a escolha da melhor opção a ser utilizada, principalmente quando se é necessário priorizar a relação custo/benefício.

Ao estudar com especial atenção a grandeza vazão, observa-se que ela pode se apresentar com diferentes níveis de intensidade e perfis de deslocamento. O estudo realizado considerou a medição em sistemas que não possuem turbulência e apresentam o deslocamento uniforme do fluido dentro da tubulação.

O processo de medida escolhido, onde o transdutor fica em contato direto com o fluido monitorado, dificultou a montagem por ser intrusivo, mas facilitou a projeção e captação dos sinais ultrassônicos e a obtenção dos resultados. Com base nessa experiência, acredita-se que o processo não invasivo seja mais criterioso para ser ajustado e utilizado, uma vez que necessita levar em consideração o posicionamento dos transdutores para encontrar a relação ótima de propagação do sinal ultrassônico.

Os circuitos estudados, utilizados em kits de desenvolvimento baseados na tecnologia abordada, apresentam características próprias e comuns, focados na potência do sinal transmitido e nas capacidades de receber, filtrar, identificar e interpretar as informações pela recepção do sinal transmitido. Nesse ponto, a evolução de processadores e circuitos de condicionamento com elevado desempenho para altas frequências tende a aumentar a exatidão dos medidores e ampliar os limites estabelecidos até a data de conclusão dessa dissertação.

Para o trabalho aqui registrado, o sinal ultrassônico aplicado à instrumentação precisou ser pensado em sua essência, a fim de buscar a melhor frequência, a melhor janela de transmissão e a melhor taxa de repetição. Para medição de vazão baseado em tempo de trânsito de sinais ultrassônicos, as características precisaram ser alteradas para cada realidade de teste, porém, os melhores desempenhos sempre estiveram em torno do padrão utilizado de 21 ciclos em 5,25 μ s com frequência de 4 MHz.

O nível dos ruídos e a influência das grandezas de interferência exigiram maior atenção pelos filtros, fazendo-se uso de mais estágios aplicados em pontos específicos. A utilização de filtros digitais e a operação com maior número de amostras se mostraram excelentes alternativas

para a separação e estabilização das informações desejadas. A interferência de ruídos sonoros, característica destacada em todos os medidores baseados em sinais ultrassônicos, pôde ser verificada, mas não causou impactos nos testes, uma vez que a planta utilizada estava em ambiente controlado. A maior parte dos ruídos veio pela opção de se utilizar o inversor de frequências para controle da vazão na planta de testes. Porém, as técnicas para mitigação de sua influência são conhecidas e puderam ser facilmente aplicadas.

Outra característica que recebeu atenção foi a variação de temperatura do meio onde ocorreu a propagação do sinal. Mesmo a velocidade do som sendo influenciada pela variação de temperatura, os resultados não foram influenciados por essa grandeza. Mesmo estimulando a variação de temperatura, não foram observadas variações significativas nos resultados devido a maior velocidade de propagação do som na água e da reduzida distância percorrida. Talvez, em aplicações com fluidos aquecidos ou criogênicos a variação da velocidade do som pela variação da temperatura careça de ser considerada. Já quando estudado a propagação do som no ar em espaço aberto, a variação de velocidade pela variação de temperatura pode ser observada com clareza, mas essa condição não foi objeto desse estudo.

A atenuação do sinal ultrassônico em seu trajeto se manteve dentro do previsto e observou-se a necessidade de buscar o perfeito casamento de impedâncias com cada ambiente. Os transdutores para aplicação em ar, quando submetidos a água, não apresentaram desempenho satisfatório e o mesmo foi observado no caso contrário. A interface de meios sempre causa refração e reflexão do sinal, sendo que o ângulo de aplicação do sinal pode ser determinante no sucesso da medição, principalmente quando há a intenção de realizar-se medições de modo não intrusivo. Os maiores impactos foram observados nas tentativas de propagar o som através da interface de meios com densidades muito diferentes, como, por exemplo, do ar para a água ou do ar para o alumínio.

A leitura e interpretação das informações contidas no sinal ultrassônico foi realizada dentro do previsto com a tecnologia escolhida. A atenção para essa parte se limitou a garantir que o processador possua resolução e discriminação compatíveis com o sinal. Os tempos observados estiveram na ordem de microssegundos e puderam ser observados nas medidas realizadas, conforme destacado nos resultados apresentados. Fica também registrado que esse mesmo estudo, bem como o sucesso de seus objetivos, pode ser obtido com outras tecnologias e isso será explorado nas oportunidades acadêmicas que permitam compartilhar o conhecimento aqui adquirido.

Os resultados apresentados satisfizeram as expectativas iniciais definidas para esse trabalho, mostrando ser possível, até mesmo com a utilização de uma planta acadêmica, atingir índices de precisão e exatidão muito bons quando comparados com o desempenho de medidores de outras tecnologias.

O circuito desenvolvido, depois de refinado, correspondeu ao esperado, tornando possível a realização das medidas de forma segura e confiável.

Os resultados alcançados mostram que os erros médios observados no percurso do transdutor 1 para 2 e do transdutor 2 para 1 foram 0,977 % e 1,033 %, respectivamente. Desconsiderando o erro zero durante o período que o fluido permaneceu estático, observa-se que o erro médio da medição de vazão por transdutores ultrassônicos baseado em tempo de trânsito com percurso único é de, aproximadamente, 1 %, e vê-se que os resultados alcançados foram satisfatórios para ambos os sentidos de vazão.

Diante do estudo realizado, dos resultados obtidos e de todas as informações apresentadas, vê-se que a utilização de sinais ultrassônicos para medição de vazão, especificamente para esse trabalho, e para diversas áreas da instrumentação, como uma opção que oferece bom desempenho para exatidão e precisão de processos industriais. Tomando como base a pesquisa de preços dos diferentes medidores de vazão, um grande desafio, associado ao desenvolvimento e aplicação dessa tecnologia, é a redução do custo. A descoberta de uma solução de baixo custo ampliará muito a aceitação e a aplicação de sensores ultrassônicos no mercado.

5.1 Trabalhos futuros

O tema base abordado nessa dissertação, medição de vazão, desperta a curiosidade e o interesse em explorar novas alternativas e possibilidades que apresentem menor erro e aplicabilidade mais ampla nos diversos fluidos possíveis de serem monitorados.

Este estudo considerou apenas a medição em sistemas não turbulentos e uniformes, deixando aberta a oportunidade de realização de novos estudos para universos mais complexos e com maior número de variáveis. Uma dessas linhas é utilizar o sistema multi-percurso para visualização do perfil de vazão e não somente do valor a ela associada.

A possibilidade de desenvolver pesquisas, na medição de vazão baseada em sinais ultrassônicos e noutras técnicas de medição de vazão, a fim de buscar soluções não intrusivas, abre um enorme leque de possibilidades para novas tecnologias e aplicações.

Entre todas as possibilidades, destacam-se as seguintes abordagens que darão continuidade na aplicação dos sinais ultrassônicos para medição de vazão:

- Estudo do comportamento dos sinais aplicados e do desempenho dos medidores de vazão baseados em tempo de trânsito de sinais ultrassônicos em multi-percurso;
- Estudo sobre o impacto do número de percursos sobre a exatidão do medidor de vazão baseado em tempo de trânsito de sinais ultrassônicos;
- Medição de vazão em sistema turbulento monofásico baseado em sinais ultrassônicos;
- Medidores de vazão ultrassônicos com transdutores não intrusivos.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Endress+Hauser Flowtec AG, “Medición de Caudal”. Endress+Hauser Flowtec, 2005.
- [2] Spitzer, D. W.The, “Flow Measurement”. 1ª Ed. Editora Instrumentation, Systems, and Automation Society ISA, 2001. 828 p.
- [3] Delmée, Gérard Jean, “Manual de Medição de Vazão” 3ª Ed. Editora Edgard Blücher LTDA, 2003. 366 p.
- [4] Phillips, Cynthia and Priwer, Shana “Amazing & Extraordinary Facts: Leonardo da Vinci” 1ª Ed. Editora F &W Media International, Ltd, 2011. 144 p.
- [5] P. Hauptmann, N. Hoppe and A. Puettmer, “Ultrasonic sensors for process industry”, IEEE Ultrasonic Symposium, Vol. 1, pp. 369-378, 2001.
- [6] Villanueva, J.M.M., Catunda, S.Y.C., Tanscheit, R., “Maximum-Likelihood Data Fusion of Phase-Difference and Threshold-Detection Techniques for Wind Speed Measurement”, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 58, Issue 7, pp: 2189-2195, 2009.
- [7] Ripka, Pavel and Tipek, Alois, “Modern Sensors Handbook” 1ª Ed. Editora ISTE Ltd, pp: 83-139, 2007.
- [8] Hua, Meng; Hui, Wang and Mingwei, Li “High-precision Flow Measurement for An Ultrasonic Transit Time Flowmeter”, International Conference on Intelligent System Design and Engineering Application, IEEE, 2010.
- [9] Schneider, P.S., “Medição de Pressão em Fluidos”, Apostila da disciplina de Medições Térmicas, Engenharia Mecânica, UFRGS, Porto Alegre, 2003. 27 p.
- [10] Soto Arriagada, T.N., “Relatório medidores de vazão” – UTFPR – campus Curitiba, 2009. 23 p.
- [11] SENAI / CST “Instrumentação Básica II - Vazão, Temperatura e Analítica – Instrumentação”, SENAI – ES, 1999. 242 p.
- [12] Site da Internet: “Rotatômetros”. Disponível em <http://www.omel.com.br/nossos-produtos/rotametros/> Acesso em 04/2016.
- [13] Webster, John G., at al, “Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook”, Congress Cataloging-in-Publication Data, publicado por CRC Press LLC, 1999. 2588 p.
- [14] Santin, J. L., “Ultra-som: Técnica e Aplicação” 2ª Ed. Editora Artes Gráficas, 2003. 255 p.

- [15] Calixto, W.P., “Poluição Sonora”, 1ª Ed., Goiânia, Universidade Católica de Goiás, 2004. 105 p.
- [16] Baker, Roger C., et al, “Flow Measurement Handbook – Industrial designs, operating principles, performance, and applications” 2ª Ed. Editora Cambridge University Press, 2016. 558 p.
- [17] Okuno, E.; Caldas, I. L.; Chow, C. “Física para Ciências Biológicas e Biomédicas” 1ª Ed. Editora Haper & Row do Brasil Ltda, 1982. 490 p.
- [18] Christensen, D. A. “Ultrasonic Bioinstrumentation” 1ª Ed. Editora John Wiley & Sons, 1988. 256 p.
- [19] Kinsler, L. E.; Frey, A.R.; Coppens, A.B. and Sanders, J. V. “Fundamentals of acoustics” 4ª Ed. Editora John Wiley & Sons, 2000. 560 p.
- [20] J. W. Strutt and B. Rayleigh, M.A., F.R.S., “The Theory of Sound”, 3ª Ed., vol. 1. Editora Macmillan am Co., 1877. 340 p.
- [21] J. Hemp, “Theory of transit time ultrasonic flowmeters”. Sound Vibration, 84(l):133-47, 1982.
- [22] Sanderson, M. L., and Hemp, J. “Ultrasonic flowmeters - A review of the state of the art. Int. Conf. on Advances in Flow Measurement Techniques”, Coventry, England, Paper G1:157-78, 1981.
- [23] Site da Internet: “Endress+Hauser at a glance”. Disponível em: <http://www.endress.com/en/Endress-Hauser-group/endresshauser-at-a-glance> Acesso em 06/2016.
- [24] Site da Internet: “About the KROHNE Group”. Disponível em: <http://krohne.com/en/company/about-the-krohne-group/> Acesso em 06/2016.
- [25] Manual do fabricante KROHNE “OPTIFLUX 1000 Technical Datasheet”, KROHNE 04/2014 - 4000690404 - TD OPTIFLUX 1000 R04 en. Disponível em: http://cdn.krohne.com/dlc/TD_OPTIFLUX1000_en_140415_4000690404_R04.pdf Acesso em 06/2106.
- [26] Manual do fabricante KROHNE “IFC 050 IFC 050 Technical Datasheet”, KROHNE 07/2016 - 4002183703 - TD IFC 050 R03 en. Disponível em: http://cdn.krohne.com/dlc/TD_IFC050_en_160907_4002183703_R03.pdf Acesso em 07/2016
- [27] Site da Internet: “About Airmar – Airmar Technology Corporation”. Disponível em: <http://www.airmartechology.com/about.html> Acesso em 08/2016.

- [28] Site da Internet: “Company Information – Szyujie”. Disponível em: http://szyujie.en.alibaba.com/company_profile.html Acesso em 10/2015.
- [29] Site da Internet: “History – D-Flow”. Disponível em: <http://www.d-flow.com/d-flow/history> Acesso em 09/2016.
- [30] Site da Internet: “T1 Development Board Schematic - Airmar Technology Corporation”. Disponível em: <http://www.airmartechology.com/uploads/AirPDF/T1%20Schematic%20Rev%2001.pdf> Acesso em 09/2016.
- [31] Manual do fabricante D-Flow “Ultrasonic Transducers Data Sheet”, 2016 D-Flow Technology AB. Disponível em: http://cdn.krohne.com/dlc/TD_IFC050_en_160907_4002183703_R03.pdf Acesso em 01/2016
- [32] European Committee for Standardization. CSN EM 1434-1 Heat Meters. Bruxelas, release 2015.
- [33] Site da Internet: “Performance Examples – D-Flow”. Disponível em: http://www.d-flow.com/sites/default/files/media/D-Flow_Information_Package_20160509.pdf Acesso em 10/2015.
- [34] Inouea, Y. “A study of ultrasonic propagation for ultrasonic flow rate measurement” Flow Measurement and Instrumentation 19 (2008) 223–232, publicado por Elsevier, 2008.

7 ANEXOS

7.1 *Artigo Development and Signal Processing of Ultrasonic Flowmeters based on Transit Time*

Development and Signal Processing of Ultrasonic Flowmeters based on Transit Time

Wanderson Eleutério Saldanha

INATEL – Instituto Nacional de Telecomunicações
Santa Rita do Sapucaí, Brazil
wsaldanha@inatel.br

Edson da Costa Bortoni

UNIFEI – Universidade Federal de Itajubá
Itajubá, Brazil
bortoni@unifei.edu.br

Abstract— In order to realize a study about the behavior of ultrasonic signals used in flow meters based on transit time method, in this paper, according to the measurement principle described, a didactic plant to flow measurement was assembled and a simple model of this sensor was developed to identify characteristics of the ultrasonic pulses that permit evaluating their responses in this application case. All parts and testing of this work were carried out in a laboratory of an educational institution in order to encourage research on the topic in the future. The circuits used in this study have low complexity and the costs are not expensive. The goal of visualizing the ultrasonic signals and the difference between transit times in both flow directions was obtained. In order to obtain success in these objectives, some circuits experimented and the final topology and results are shown in this paper. The experimental results show that the proposed method is efficient to flow measurement, the error is reduced and the variations of transit time can be easily identified.

Keywords—ultrasonic flowmeter; transit time method, transducer, signal processing, ultrasonic signal;

I. INTRODUCTION

Until 2015, one of the most important variables of the industrial process is the flow, together with pressure, temperature and level. The measurement of this variable is an enormous challenge because there are several applications from a blood flow in an artery to discover a pathology, to a water flow in a large river to make hydrographic monitoring and control [1]. An interesting point on this kind of measurement process is the fact that the applied theories and concepts are the same in all cases. So, the big question is obvious: how is possible to cover all applications, if there are several products with different properties on the most several applications with a lot of pipe formats and dimensions on process structures to fluid conduction? In order to guarantee the measurement of all cases, some theories about specific principles are used by manufacturers on their products, each one with their own characteristics, advantages, and disadvantages. A common point of this challenge is the fact that everyone is focused on obtaining the best results. This is necessary, due to the importance of measuring in manufacturing processes (mainly those ones known as custody transfer, monitoring and process control) [2].

Hauptmann told in their research that the fluid flow measurement is interesting in several applications. For example: In the turbines to generate electric energy, the measurement of the speed of the wind allows them to draw wind maps and

choose the best place to new generator parks; In the wind tunnels to study the efficiency of aerodynamic structures; In the industrial sector to flow measurement of gases and fluids; and others [3].

In the middle of the possible principles to flow measurement, there are the ultrasonic methods, that offer some techniques: transit time, doppler effect, cross correlation, change of phase and deviation of the ultrasonic signal. Particularly, one of these techniques will be detailed and used in this paper: the ultrasonic flow meter based on transit time.

In the ultrasonic flow meter based on transit time, it is necessary know the pipe dimensions, the mechanic structure of the sensor, the exact position of the transducers and transit time, that defines how long an ultrasonic signal takes to travel a distance between two transducers. Based on the distance between the transducers and the time measured, it is possible to calculate the mean velocity of fluid in the pipe. With the fluid mean velocity in both directions and with the pipe dimensions is possible to define the fluid flow and direction.

The present paper carries out a review of physics principles applied in this method and makes reference to the most relevant publications related about transit time. Firstly, a brief explanation of the principle based on ultrasonic signal transit time to flow measurement is represented. Following this, the project of a prototype developed for ultrasonic signals measurements is detailed. In the sequence, the presentation continues describing the build of the didactic plant to flow measurement. After this, the results of the tests are shown. Finally, the conclusion discusses the real results in comparison with the theoretical expectations, offering possibilities to new researchers.

II. OPERATIONAL PRINCIPLE

A. Physics Principle

English physicist and winner of Nobel Prize, Lord Rayleigh, developed the base of physics applied in this principle. His book about the theory of sound (The Theory of Sound) was published in 1877 and describes the propagation of sound waves in gasses and solids [4].

The acoustic measurement method is based on the fact that the propagation velocity of an acoustic wave, c , and flow velocity, v , are added vectorially. This condition can be viewed on Fig. 1.

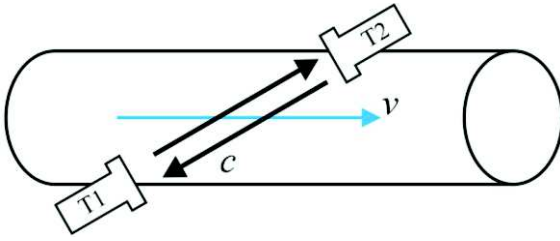


Figure 1. Propagation vectors of flow, v , and acoustic wave, c .

It is easy to check that the time between transducers T1 and T2 depends on the flow direction and velocity. So it is possible to check that the difference between the sound propagation times of T1 to T2 and of T2 to T1 are directly proportional to flow.

B. Measurement Principle

The Ultrasonic Flowmeters based on Transit Time makes the flow measurement by the difference between the propagation times of two ultrasonic pulses, one of the Transducer 1 to Transducer 2, one of the Transducer 2 to Transducer 1 like shown on Fig.2.

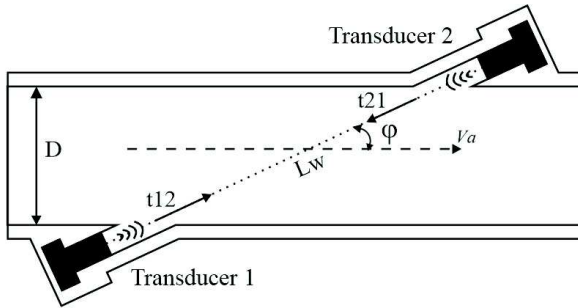


Figure 2. Ultrasonic Flowmeters based on Transit Time principle.

If there are no transverse components of flow on the pipe, the times t_{12} and t_{21} can be determined by the (1) and (2).

$$t_{12} = \frac{Lw}{c + v_a \cos \varphi} \quad (1)$$

$$t_{21} = \frac{Lw}{c - v_a \cos \varphi} \quad (2)$$

Where:

Lw is the distance between transducers;

c is the speed of the sound at the operating conditions;

φ is the angle between the pipe axial axis and the course of the acoustic signal;

\bar{v}_a is the axial average velocity along Lw distance.

The sound that goes in the same direction of the flowing fluid is faster than that other sound in the opposite direction.

Generally, the transducers are used like transmitter and receiver, so the difference between times is determined with only a couple of transducers. In this case, the axial velocity averaged \bar{v}_a along of the acoustic way is calculated by the (3).

$$\bar{v}_a = \frac{Lw}{2 \cos \varphi} \left(\frac{1}{t_{12}} - \frac{1}{t_{21}} \right) = \frac{D}{2 \cos \varphi \sin \varphi} \left| \frac{t_{21} - t_{12}}{t_{12} t_{21}} \right| \quad (3)$$

Where:

D is the pipe diameter on that the draining of fluid occurs.

The physical concept applied to define flow shows that this characteristic is obtained by the relation between volume V and time t . Consequently, the flow can be defined by the product between velocity v and transverse section area A , like the (4) shows.

$$Q = \frac{V}{t} = vA \quad (4)$$

Unfortunately, in real applications in industries with extreme conditions it is impossible to consider that v and v_a has the same value. In this cases, is necessary use the hydraulic corrective coefficient k_h , that consider the flow profile (laminar or turbulent, for example), and can be defined by the (5).

$$k_h = \frac{\bar{v}}{v_a} \quad (5)$$

Where \bar{v} is the mean velocity over the cross section.

According to with the objectives of this paper, in a didactic plant to flow measurements, velocities v and v_a will be considered under non turbulent flow profile. Therefore, the flow Q can be defined in relation to (3) and (4), and the result is showing on (6).

$$Q = \frac{\pi D^3}{4 \sin(2\varphi)} \left| \frac{t_{21} - t_{12}}{t_{12} t_{21}} \right| k_h \quad (6)$$

On the method to measure the flow by ultrasonic flowmeter based on transit time, ultrasonic pulses with some cycles are transmitted in each direction and it is necessary to measure the time spent from the transmission until the signal to be received. Fig. 3 shows the relationship between the times t_{21} (1) and t_{12} (2), and tm is the average of these.

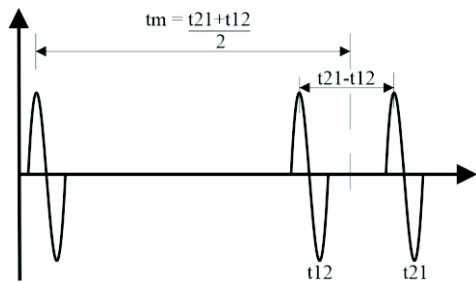


Figure 3. Diagram of signals to illustrate measurement based in ultrasonic transit time.

Mr. Hemp shows an example of this kind of signal in his work, where to measure the water flow it is considered a pipe with a diameter equal to 50 mm, ultrasonic pulse with 6 cycles, frequency of 1 MHz, 1.5 mm of the length wave and wave packages with nearly 9 mm of the length [5]. This data will be used as a reference to define the standard signals in this work. Fig. 4 shows a real ultrasonic pulse.

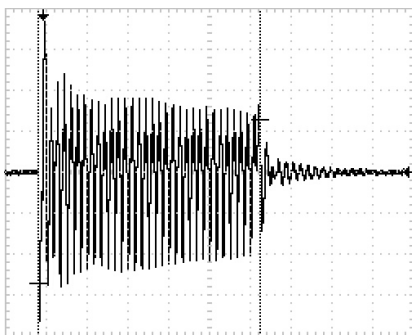


Figure 4. An example of a real ultrasonic pulse obtained by tests of this paper.

Many manufacturers offer complete measurement devices with transducers assembled on both sides of the pipe. These sensors are generally called "radial" in function of their transducer placement. The pipe size to use this method should be bigger than 100 mm. [6]

These sensors are many times used in active processes, where is desired to install the measuring system without stopping the process, neither cutting off the conduction structure of the fluid. In order to attend all applications, the transducers assembly can be installed internally or externally in the pipe. In the first case, the method is called invasive and the transducer should have contact with the analyzed fluid. In the second situation, the transducers are assembled in the external structure of the pipe, fixed in the majority of the cases with a metallic clamp or other equivalent structure. Metering sections with up to 13 m or more can be attended in this way. In this work, the chosen method is the first described, invasive.

III. PROTOTYPE DESIGN

This work can be divided into two parts: mechanics and electronics.

A. Mechanical Prototype

Before obtaining the final version of the mechanical model to the prototype, the first attempt was idealized using concepts applied to a non-invasive method. The paper "A study of ultrasonic propagation for ultrasonic flow rate measurement" [7] contributed significantly to the chosen definitions. However, this method showed critical points to obtain success and some technical limitations led to the development of the second option, using the invasive method.

After researching papers published by the university research centers and manufacturers, the specifications indicated by the D-Flow manufacturer were chosen as reference. [8]

The angle to send ultrasonic signal is 25° between the pipe axial axis and the course of the acoustic signal. The prototype internal diameter is 25.40 mm (1 in) and the final distance between transducers is nearly 60.1 mm. Some mechanic prototype details are shown on Fig. 5.

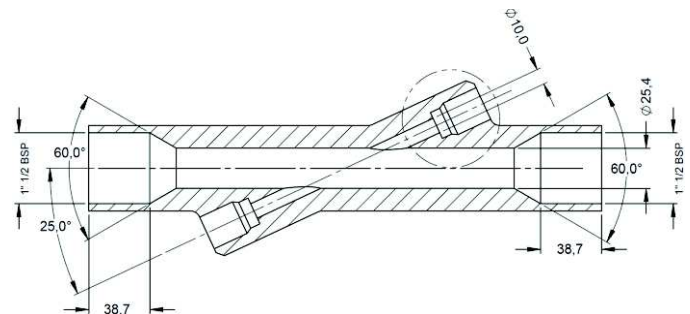


Figure 5. Mechanic drawing of the prototype (mm).

The mechanic solution provides low interference in the course of the fluid that is flowing inside the pipe. Therefore, this solution does not cause considerable turbulence in the fluid. The loss of load was very low and the result was satisfactory too. This prototype was built in aluminum and the connections in polyvinyl chloride (PVC). Unfortunately, the direct contact of the transducer with the aluminum structure of the mechanic prototype provides a little resonance in the structure and was impossible to check ultrasonic signals. In order to solve this problem, a mechanic insulation with o-rings (rubber rings) was used and registered the ultrasonic signals.

B. Electronic Prototype

The electronic circuit is responsible for reading and showing the ultrasonic signals. Is indispensable to identify the difference between the transit times of the ultrasonic pulses in both directions (t_{12} and t_{21}). Therefore, in the electronic prototype, there are analog and digital circuits to signal conditioning, processing and analysis of the information. The signal levels were limited to guarantee the best read without noise after filters and amplifiers. Fig. 6 is showing the block diagram of the complete solution.

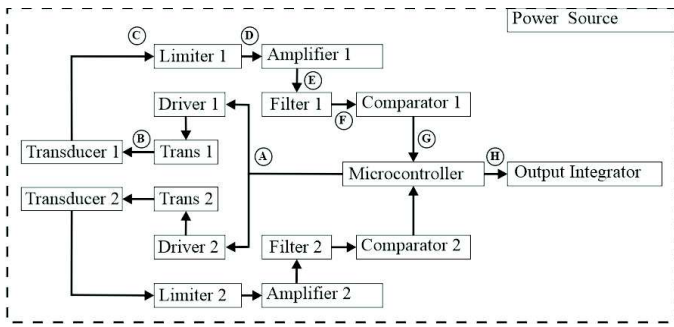


Figure 6. Block diagram of the electronic solution.

Power Source offers the ideal energy for each part of the circuit and excitation of transducers. Transducers are the chosen on the D-Flow manufacturer. Transformers are used to increase the voltage of the ultrasonic transmission signal. However, when the same transducers receive these same signals it is necessary to increase the level again. In the reception are used high sensibility circuits.

Drivers are power switches that increase the potential of the microcontroller to excite the primary of the transformers. Without this circuit it would be impossible to send the signals straight from the microcontroller.

Limiters receive every signal from transducers (transmission and reception). Logically, the transmission signal has a bigger level than the reception signal. In this case, these circuits establish limit levels to next stages of circuits.

Amplifiers increase the signal levels after limiters and filters, in order to send an information with a minimum of noise to the microcontroller.

Filters are used to mitigate interferences. The main interferences, in this case, are the low frequency of the electromagnetic fields and acoustic noises. Strategically, the filters are tuned in to the same frequency used for excitation of the transducers, 4 MHz.

Comparators are used to adjust ultrasonic signals with high frequency and send to microcontroller an easier read signal. The objective in this stage creates a window proportional to ultrasonic pulse, in order to the program on the microcontroller read only transitions, up and down. Therefore, the transit time of the ultrasonic pulses can be securely measured.

Output integrators are important to promote an output analog signal proportional to the difference between transit time of the ultrasonic pulses and, consequently, to the fluid flow. This analog output signal attends requirements of the industrial standard from 4 to 20 mA.

The microcontroller is the base of all signal control and analysis. The program to control the signals, make a logical analysis of the results and to generate standard output signals is on the microcontroller. Furthermore, there are digital filters and other resources for signal processing implemented with the basic features.

After concluding the development of the mechanical and electronic solutions, the next step is to confirm if the prototype is valid and efficient. In order to guarantee this validation, a

controlled didactic plant to flow measurement with a reference sensor was built.

IV. DIDACTIC PLANT TO FLOW MEASUREMENT

As a first step to building a didactic plant, a commercial sensor with reliable characteristics was chosen as a reference to flow measurement. Some manufacturers offer solutions with technologies based on ultrasonic signals, but these solutions are not the better cost-benefits relation. This fact increases the importance of this paper. Therefore, a magnetic model was chosen and the fluid used for tests is clean water.

The chosen sensor is the OPTIFLUX 2050 of the manufacturer Krohne. This model has operating range from 0 until ± 12 m/s, accuracy equal 0.5% of the measured value above 0.5 m/s, below 0.5 m/s, deviation ± 2.5 mm/s, repeatability equal $\pm 0.1\%$ of the measured value, minimum 1 mm/s, output 4-20 mA + HART, an active pulse output and an RS-485 Modbus output for communication with microcontrollers and PLCs as an option. [9] [10]

In order to promote a controlled water flow to the tests, a hydraulic pump was used with 3 cv of power, model ECS-300T of the manufacturer Eletroplas, and an Adjustable Frequency Driver, model PowerFlex 4M of the manufacturer Allen-Bradley. The main objective is to promote water flow control by frequency variation and, consequently, by pump velocity variation.

The base of bends and distances between them was obtained in accordance with specifications to use the reference sensor. [9]

The didact plant can be seeing on Fig. 7.

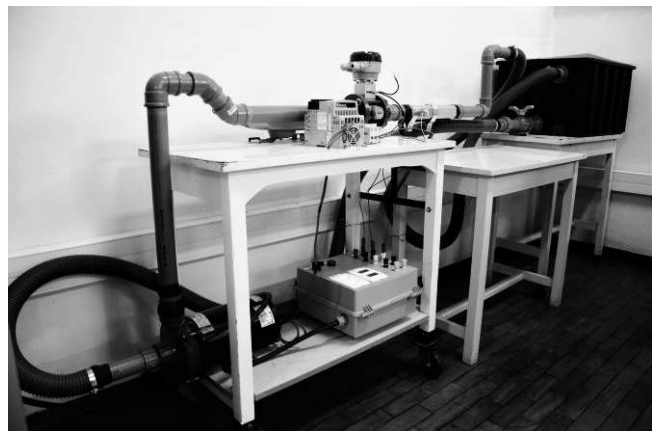


Figure 7. Didactic plant to flow measurement.

All pipes used in the plant have diameter equal 1 1/2 inches and the bends favor the system stability, in order to conserve the water flow without turbulence.

V. EXPERIMENTAL RESULTS

The first result that deserves attention is transducer quality. Tests realized with different transducers had results that show the need of using excellence transducers. In Fig. 8, the first image (a) a transducer was used with questionable quality and the second image (b) show results with excellent transducer.

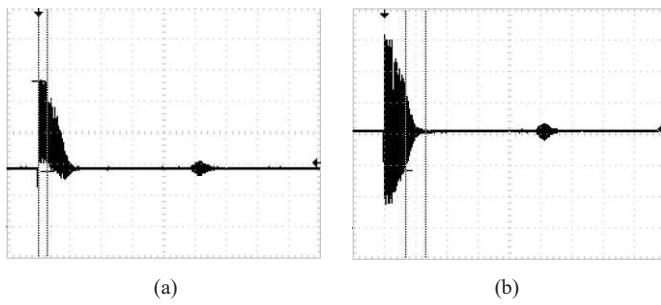


Figure 8. Signals with different transducers.

Verify the difference between qualities of the signals is easily possible. In the second situation, the identification of the interest information to objectives determined is simpler and, consequently, the circuits and data processing too.

The ultrasonic pulse used to transducer excitation that offered better result has 20 cycles with frequency equal to 4 MHz and the calibration was made by a ramp signal. In this case, if desired, it is possible to change pulse profile by ramp signal profile. So, it is possible to check the relation between signals as defined as follow. Using a ramp signal it is possible to choose the transmission time. During the ramp growing, the generation of the 4 MHz ultrasonic signal occurs. The maximum transmission window is defined by ramp time and high state signal (saturation condition). After transmission, the time on the low state defines the interval until next pulse of the ultrasonic signal. This condition is shown on Fig. 9.

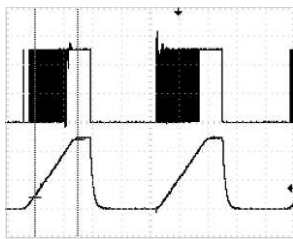


Figure 9. Ultrasonic pulse adjusted by a ramp signal.

The measurement system was calibrated at the extremes: zero (lower value measured) and full scale (higher value measured). The flow limits were adjusted between 0 until $5.067 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ (5.067 l/s), that is equivalent to fluid velocity between 0 and 10m/s. On the same objective, the output signal was adjusted to change his value between 4 and 20mA proportional to flow.

The signals shown in the next image illustrates the ultrasonic signal passing on the complete circuit. Each point is identified on Fig 10.

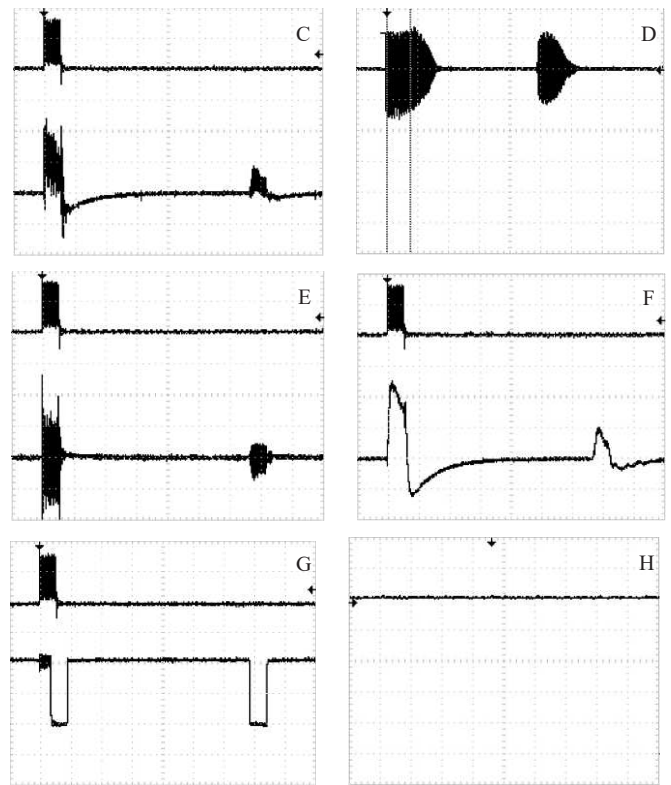
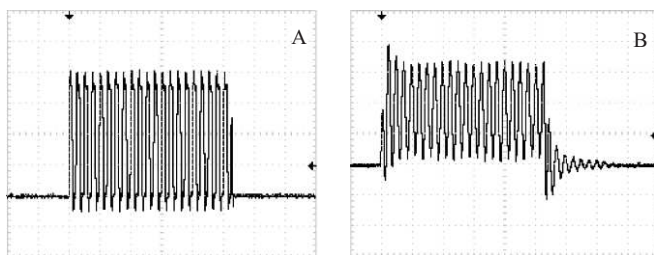


Figure 10. Ultrasonic pulse present at each point of the circuit (see Fig. 6).

Through the images it is possible to see all the conditioning work and readings of the ultrasonic signal. Some electronic components caused deformities of the original ultrasonic signal by his dynamic characteristics. It is also possible to verify some points with a little noise, but this has not compromised the measures.

The test was made using clean water in the near temperature 20°C . There were little variations in the water temperature to modify the ultrasonic speed, but this fact is not considered on the calculus and measurements. In calculus, sound velocity on the water equal to 1480 m/s was used.

To the evaluation of the relationship between transit time of the ultrasonic signal in the system and flow rate, some characteristics for performance analysis of the proposed solution: precision, accuracy, sensibility, linearity and errors will be used.

In the first verification was calculated a standard deviation to obtain the precision. The theoretical concept shows that is possible discover the precision by the standard deviation.

The precision was verified in three conditions: null flow, in the middle of the range and in the full scale. The precision with ten measures in each of three conditions was verified: null flow, in the middle of the range and in the full scale. For this was used the difference between transit times. In the first case, the standard deviation was equal to $483.05 \cdot 10^{-6}$, in the second the standard deviation was equal to $6.75 \cdot 10^{-3}$, and in the last one, the standard deviation was equal to $7.07 \cdot 10^{-3}$.

To determine other characteristics several measures are necessary in different flow rate adjustments. The flow rate was adjusted by adjustable frequency driver that modifies directly the pump velocity and the reference by the magnetic sensor. In this situation, a human fault on the plant adjusts is possible.

Initially, the flow was applied in the direction from transducer 1 for transducer 2 and the transit time of ultrasonic pulse was noted. After this, the flow was modified and applied in the direction of transducer 2 to transducer 1 and again the transit time of ultrasonic pulse was noticed. Following to these measurements, the difference between these times was calculated and the results can be view on the Fig. 11 and Fig. 12.

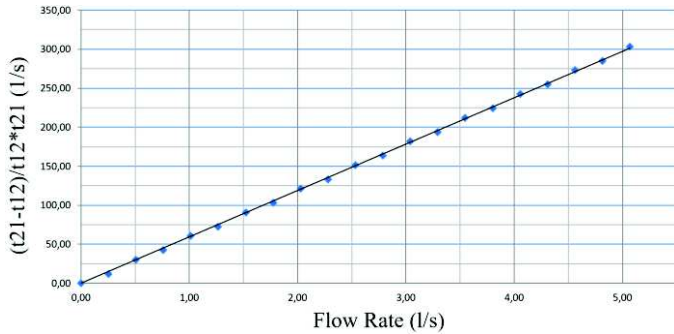


Figure 11. Ultrasonic pulse performance in the direction from transducer 1 for 2.

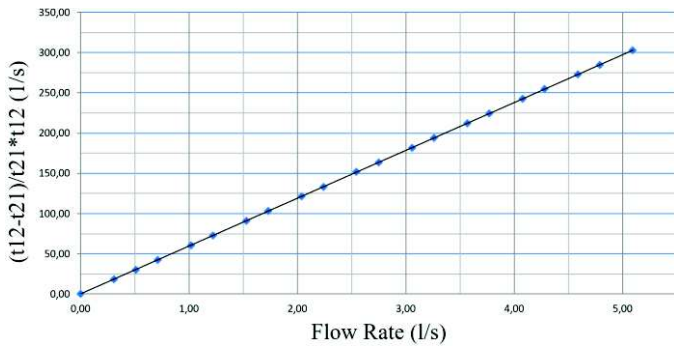


Figure 12. Ultrasonic pulse performance in the direction from transducer 2 for 1.

It is possible to check that minor transit time difference is about 25 ns. Therefore, if the objective is to obtain the resolution of 1 %, a time resolution lower than 250 ps is needed.

Sensibility is only applied to linear systems. But, is possible take on an error to approximate the system to a linear and determine the sensibility. It is defined as system sensibility the relation between an input signal and the respective variation in the output. Based on this theory, the sensibility was calculated by the difference between transit times and by output current. The results were $59.52 \text{ s}^{-1}/\text{l/s}$ and 3.16 mA/l/s , respectively.

The linearity error should be determined by the difference between system response and a line perfectly straight. In this case, the error was equal to 0.997% when the flow was applied in the direction from transducer 1 for transducer 2. When the

flow was applied in the opposite direction, the error was equal 1.033%.

In order to conclude the results presentation, the maximum error was defined by the difference between ideal values calculated with theoretical expectations and real values measured. One more time was used as reference the difference between transit times of ultrasonic pulses in their ideal and real values. The results were 2.95% of maximum error when the flow was applied from transducer 1 to transducer 2, and 3.12% when applied in the opposite direction.

VI. CONCLUSION

In the model of ultrasonic flowmeter studied, several problems increased the challenge to measure the ultrasonic signals with accuracy. This technical is recommended to bigger pipes than 1 inch. Usually, the others researchers prefer to use pipes that guarantee a minimum 100 millimeters between transducers. On the other hand, this work was completely concluded into an educational institution and the results were in accordance with the expectations since the characteristics were similar to the theoretical development.

The measurement of the ultrasonic signal and their processing should consider a high level of noise. The mechanic insulation of the transducers using rubber rings is necessary and the electronic circuits to filter and amplify the analog signal before the digital conversion is fundamental. The digital information, after arrived at microcontroller, shows several possibilities to use the information about transit times and, consequently, flow to generate standard analog signals, according to industrial environments. With microcontroller it is possible to reduce, or eliminate, the linearization error and contribute with calibration of the system based in controlled and standards flow levels.

The sensibility results were $59.52 \text{ s}^{-1}/\text{l/s}$ and 3.16 mA/l/s , respectively to transit time and current output. These results show the average of all measurements. It is possible obtain better results with more prototypes to new tests and comparison.

The measurements show that the maximum value of linearity error is equal 1.033% when the flow was applied in the direction from transducer 2 for 1. The linearity can be corrected by the microcontroller and best results can be obtained if necessary.

By the comparison between measurements on the reference meter, OPTIFLUX 2050 of the manufacturer Krohne, and direct measurements of the transit times, the maximum error of accuracy were 3.12%, when the flow was applied from transducer 2 to 1. The instability of the flow and possible turbulences, even if very low, may have contributed to the results. Maybe, with the another plant to flow measurement or another reference meter the results could change.

But the problems presented do not harm the goal of this study. The proposed conditioning method of the ultrasonic signals to measure transit time-based flow, and find a valid link between the input and output signals has been achieved. So, the ultrasonic flowmeter based in transit time shown in this paper has a great potential for industrial applications and new researches and publications about this.

REFERENCES

- [1] Endress+Hauser Flowtec AG, “Medición de Caudal”, Endress+Hauser Flowtec, 2005.
- [2] The Instrumentation, Systems, and Automation Society ISA, “Flow Measurement”, D. W. Spitzer Editor, 2001.
- [3] P. Hauptmann, N. Hoppe and A. Puetzner, “Ultrasonic sensors for process industry”, IEEE Ultrasonic Symposium, Vol. 1, pp. 369-378, 2001.
- [4] J. W. Strutt and B. Rayleigh, M.A., F.R.S., “The Theory of Sound”, 3rd ed., vol. 1. London, Macmillan am Co., 1877.
- [5] J. Hemp, “Theory of transit time ultrasonic flowmeters”. Sound Vibration, 84(1):133-47, 1982.
- [6] H. P. Vaterlaus, T. Hossle, P. Giordano, and C. Bruttin “Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook”, Library of Congress Cataloging-in-Publication Data, CRC Press LLC, pp. 778-786, 1999.
- [7] Y. Inouea, H. Kikura, H. Murakawa, M. Aritomi, M. Mori, “A study of ultrasonic propagation for ultrasonic flow rate measurement”, Flow Measurement and Instrumentation 19 (2008) 223–232, Elsevier, Science Direct, 2008.
- [8] D-Flow Technology AB, “D-Flow Information Package”, [online]. Available: http://www.d-flow.com/sites/default/files/media/D-Flow_Information_Package_WEF15.pdf, 2015 (current Apr. 20, 2016).
- [9] Krohne Products – OPTIFLUX 2000, “OPTIFLUX 2000 Handbook”, [online]. Available: http://cdn.krohne.com/dlc/MA_OPTIFLUX2000_en_140416_40008395_04_R04.pdf, 2015 (current Apr. 20, 2016).
- [10] Krohne Products – IFC 050, “IFC 050 Handbook”, [online]. Available: http://cdn.krohne.com/dlc/TD_IFC050_en_130820_4002183702_R02.pdf, 2015 (current Apr. 20, 2016).
- [11] F. Hofmann, “Fundamentals of Ultrasonic flow measurement for industrial applications”, KROHNE Messtechnik GmbH & Co. KG, Duisburg, 2000, [online]. Available: http://www.investigacion.frc.utn.edu.ar/sensores/Caudal/HB_ULTRAS ONIC_e_144.pdf (current Apr. 20, 2016).
- [12] M. Hua, W. Hui, L. Mingwei, “High-precision Flow Measurement for An Ultrasonic Transit Time Flowmeter”, IEEE International Conference on Intelligent System Design and Engineering Application, 2010.
- [13] J. Reyes, “Modeling and Simulation of Ultrasonic Flow Meters: State of Art”, IEEE, 2010.



Wanderson Eleutério Saldanha was born in Bom Despacho, Brazil, on January 1976. He received the Electrical Engineering degree from National Institute of Telecommunications (INATEL), Santa Rita do Sapucaí, Brazil, in 2000; the Specialist in Teaching for Higher Education from the Higher Education Center in Management, Technology, and Education (FAI), Santa Rita do Sapucaí, Brazil, in 2012; Nowadays, he is currently working on his master degree dissertation. He was development engineer for sixteen years in a manufacturing of sensors, instruments, and solutions for industrial automation. He is currently a Professor at INATEL and at Electronics Technical School “Francisco Moreira da Costa” (ETE “FMC”), Coordinator of the INATEL’s Robotics Team and General Coordinator of the INATEL Technology Fair. His research interests include sensors, instrumentation, robotics, power generation, hydraulic and pneumatic systems, and energy systems.



Edson da Costa Bortoni (S’94–M’96–SM’05) was born in Maringá, Brazil, on December 1, 1966. He received the Electrical Engineering degree from Itajubá Federal University (UNIFEI), Itajubá, Brazil, in 1990; the M.Sc. degree in energy systems planning from the University of Campinas, Campinas, Brazil, in 1993; the D.Sc. degree in power systems from the Polytechnic School of the University of São Paulo (USP), São Paulo, Brazil, in 1998; and the Academia Scholar degree (Habilitation) from USP, São Carlos, Brazil, in 2012. He was a Visiting Professor at Amazon University, Manaus, Brazil, an Adjunct Professor at São Paulo State University, Guaratinguetá, Brazil, and a Visiting Scholar at École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Switzerland, in 2015. He is currently a Professor at UNIFEI. His research interests include electrical machines, instrumentation, power generation, smart grids, and energy systems. Dr. Bortoni was elected as a 2014-2015 Star Reviewer of the IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION. He is a Fellow Member of the Instrument Society of Automation.