

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**MEDIDOR DE VAZÃO ULTRASSÔNICO
DE MULTI-TRAJETÓRIAS**

Mateus Mendes Campos

Itajubá, Junho de 2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

Mateus Mendes Campos

**MEDIDOR DE VAZÃO ULTRASSÔNICO
DE MULTI-TRAJETÓRIAS**

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:

Luiz Eduardo Borges da Silva

Coorientador:

Giscard Francimeire Cintra Veloso

Junho de 2017

Itajubá-MG

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

Mateus Mendes Campos

**MEDIDOR DE VAZÃO ULTRASSÔNICO
DE MULTI-TRAJETÓRIAS**

Dissertação aprovada por banca examinadora em 05 de junho de 2017, conferido ao autor o título de **Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica**.

Banca Examinadora:

Dr. Erik Leandro Bonaldi
Dr. Levy Ely de Lacerda de Oliveira
Prof. Dr. Robson Bauwelz Gonzatti
Prof. Dr. Giscad Francimeire Cintra Veloso (Coorientador)
Prof. Dr. Luiz Eduardo Borges da Silva (Orientador)

Junho de 2017

Itajubá-MG

“Ora, a fé é o firme fundamento das coisas que se esperam, e a prova das coisas que não se vêem”.

(Hebreus 11: 1)

Agradecimentos

Agradeço primeiramente A Deus por todas as Suas Obras, por esta etapa concluída e por me sustentar em momentos difíceis.

Agradeço à CAPES pela ajuda financeira em 24 meses de trabalho.

Agradeço ao professor Dr. Luiz Eduardo Borges da Silva por sua orientação, e pelas oportunidades e desafios que me ofereceu para enriquecer minha experiência profissional.

Agradeço ao professor Dr. Giscard Francimeire Cintra Veloso por sua orientação.

Agradeço a Levy Ely de Lacerda de Oliveira e Erik Leandro Bonaldi por seu apoio, pelas oportunidades oferecidas e pelas contribuições neste trabalho.

Agradeço a Jonas Guedes Borges da Silva pelas contribuições neste trabalho.

Agradeço ao meu amigo Carlos Eduardo Teixeira pela ajuda e contribuição neste trabalho.

Agradeço ao professor Dr. Germano Lambert-Torres e ao professor Ismael Noronha pela contribuição neste trabalho.

Agradeço a Ramon Rodrigues de Sá pela contribuição e auxílio para o desenvolvimento do projeto.

Agradeço também a Camila Paes Salomon, colega de Instituto Gnarus, pela contribuição neste trabalho.

Agradeço ao pessoal da Empresa Rennosonic Tecnologia LTDA, Vitor Raimundo Maia Pamplona, Caio Farias Zarconi Cavalcanti Duarte e Gustavo Ferreira de Souza, pelo apoio neste trabalho.

Agradeço a Marcos Roselli pela ajuda neste trabalho.

Agradeço ao pessoal da Empresa PS Soluções, Anelise Duarte e Sueli Guedes, pelo apoio neste trabalho.

Agradeço aos meus Pais, Antonio Maria Claret Campos e Veranilza Campos, e irmãos, Marcos Antonio Mendes Campos e Marcela Mendes Campos, pela compreensão, pelo incentivo e pelo apoio em todos os momentos da minha vida.

Agradeço a Alexandre Magno Pimentel pela amizade e apoio dado.

Agradeço aos meus familiares e aos meus colegas, e a todos que contribuíram direta ou indiretamente neste trabalho.

Resumo

Embora existam diversas abordagens para medições de vazão, o método ultrassônico de multi-trajetórias tem ganhado interesse pela indústria e por pesquisadores, pois tais medidores apresentam robustez, boa exatidão e precisão, e podem atingir classes de exatidão menores que 1%. Esta abordagem também permite a medição de grandes vazões, medições bidirecionais de fluxo e flexibilidade quanto ao fluido a ser medido. O presente trabalho apresenta o desenvolvimento de um medidor de vazão ultrassônico de multi-trajetórias utilizando o método de tempo de trânsito, com base nas informações contidas na norma IEC41. O protótipo desenvolvido consiste na eletrônica de emissão e recepção das ondas ultrassônicas, processamento de sinais e no software de cálculo de vazão. O projeto visa o uso de dezesseis transdutores, formando oito trajetórias acústicas divididas em dois planos cruzados, porém, arranjos com outras estruturas são previstos no sistema. A técnica de Correlação Cruzada foi utilizada para medir os tempos de trânsitos entre os sinais ultrassônicos.

Resultados de simulação são apresentados no documento, assim como medições feitas em laboratórios de calibração de medidores de vazão comparando os valores medidos pelo protótipo com o valor obtido no laboratório.

Palavras-Chaves: Medidores de Vazão Ultrassônicos; Tempo de Trânsito; Correlação Cruzada

Abstract

Although there are several approaches for flow measurements, the multi-path ultrasonic method has gained particular interest by industry and researchers, because such meters are robust, provide good accuracy and precision, and can achieve accuracy classes lower than 1%. This approach also allows the measurement of large flows, bidirectional flow measurements and flexibility regarding the fluid to be measured. This work presents the development of a multi-path ultrasonic flowmeter using the transit time method, based on information contained in the IEC 41 standard. The prototype developed comprises the electronic for emission and reception of ultrasonic waves, signal processing and flow calculation software. The project aims to use sixteen transducers, forming eight acoustic paths divided into two crossed planes, however, arrangements with other structures are also considered in the system. The cross-correlation technique has been used to measure the transit time between the ultrasonic signals.

Simulation results are presented in the document, as well as measurements made in calibration laboratories of flow meters comparing the values measured by the prototype with the value obtained from the laboratory.

KEYWORDS: Ultrasonic Flowmeter; Transit Time; Cross - Correlation

Sumário

Agradecimentos	i
Resumo	iii
Abstract	iv
Sumário	v
Figuras	ix
Tabelas	xiii
Capítulo 1 - Introdução.....	1
1.1. Estado da Arte	3
1.1.1. Medidor de Vazão Ultrassônico por Tempo de Trânsito	3
1.1.2. Tipos de medidores de vazão por tempo de trânsito	3
1.1.3. Medidor de vazão de uma trajetória acústica	5
1.1.4. Medidor de Vazão de Múltiplas Trajetórias	7
1.2. Análise de Mercado	9
1.3. Objetivo.....	12
1.4. Distribuição do trabalho	12
Capítulo 2 – Contexto Teórico	14
2.1. Conceitos de Dinâmicas dos Fluidos	14
2.1.1. Tipos de conduto.....	14
2.1.2. Classificação dos movimentos ou escoamentos.....	14
2.1.3. Viscosidade de fluidos	15
2.1.4. Descarga de massa e vazão volumétrica	16
2.1.5. Perfis de velocidade	16
2.2. Conceitos de Acústica	19
2.2.1. Velocidade de propagação	19
2.2.2. Tipos de propagações.....	20
2.2.3. Impedância acústica	21
2.2.4. Pressão acústica	22
2.2.5. Intensidade sonora	22
2.2.6. Atenuação do som.....	22
2.2.7. Ondas ultrassônicas	23
2.2.8. Transdutores Ultrassônicos.....	24
2.2.8.1. Componentes estruturais do transdutor aplicados em medição de vazão	25
2.2.8.2. Características de um transdutor ultrassônico	26
2.3. Cálculo de Vazão a partir dos Tempos de Trânsito.....	28

2.3.1. Posicionamento dos transdutores no conduto	28
2.3.2. Princípio de medição	29
2.3.3. Cálculo de vazão para uma trajetória acústica	31
2.3.4. Cálculo de vazão para várias trajetórias acústicas	32
2.3.4.1. Função de fluxo de área [31]	32
2.3.4.1. Métodos de integração.....	34
Capítulo 3 – Eletrônica do Sistema de Medição de Vazão Ultrassônico	36
3.1. Introdução	36
3.2. Proposta do protótipo do projeto.....	40
3.2.1. Descrição do bloco Transdutor	40
3.2.1.1. Excitação de transdutores ultrassônicos	40
3.2.1.2. Características do Transdutor para aplicação em sistema de medição de vazão ultrassônico a Tempo de Trânsito.....	42
3.2.1.3. Transdutores utilizados.....	43
3.2.2. Descrição do bloco Multiplexador	44
3.2.3. T/R Switches.....	44
3.2.4. Pulser	44
3.2.4.1. Conceito	44
3.2.4.2. Modelo utilizado.....	46
3.2.5. Controlador de Periféricos	46
3.2.6. Sistema de Aquisição de Dados	47
3.2.7. Single Board Computer (SBC)	47
3.2.8. Touch Screen	48
3.2.9. Diagrama de temporização do software embarcado desenvolvido para o sistema de Controle de Periféricos	48
3.3. Resultados do desenvolvimento do hardware	49
3.3.1. PCI Pulser	50
3.3.2. PCI Multiplexador	50
3.3.3. PCI AGC.....	51
3.3.4. Sistema de Aquisição de Dados.....	52
3.3.5. Protótipo versão 1	52
3.3.6. Protótipo versão Final	53
3.4. Comentários e discussões.....	53
Capítulo 4 – Processamento de Sinais e Dados do MVU	54
4.1. Introdução	54
4.2. Teoria de medição de Tempo de Trânsito	54
4.2.1. Técnicas de estimativa de Tempo de Trânsito	55
4.2.2. Cross Correlation	57
4.2.3. Interpolação	58

4.3. Processamento digital de sinais e dados do MVU.....	60
4.3.1. Estimativa dos valores de tempo de trânsito (ToF).....	61
4.3.2. Processamento estatístico dos valores de tempo de trânsito	65
4.3.3. Cálculo de vazão volumétrica.....	65
4.3.3.1. Cálculo de velocidades axiais médias (<i>v_{axi}</i>).....	65
4.3.3.2 Cálculo da vazão volumétrica a partir das velocidades axiais médias.....	65
4.3.4. Estatística dos valores de vazão volumétrica.....	66
4.3.5. Algoritmo de controle do AGC (Automatic Gain Control)	67
4.4. Comentários e discussões.....	70
Capítulo 5 – Software do Medidor de Vazão Ultrassônico	71
5.1. Funcionamento do software	71
5.1.1. Funcionamento do processo de Configuração	72
5.1.2. Funcionamento do processo de Conexão.....	74
5.1.3. Funcionamento do processo de Ajuste de Ganho	75
5.1.4. Funcionamento do processo de Medição.....	75
5.2. Desenvolvimento do software.....	77
5.2.1 Ações do sistema	77
5.2.2. Telas do sistema.....	77
5.2.2.1. Tela Configurar	77
5.2.2.2. Tela Conectar	78
5.2.2.3. Tela Principal	78
5.2.3. Arquitetura do software	78
5.2.4. Diagrama de Uso	79
5.3. Resultados do Software.....	79
5.3.1. Telas relacionadas a parte de Configurar	79
5.3.2. Telas relacionadas à parte Conectar.....	84
5.3.3. Tela Principal.....	86
5.4. Comentários e discussões	87
Capítulo 6 – Resultados Experimentais.....	88
6.1. Introdução	88
6.2. Objetivo.....	88
6.3. Materiais e Métodos.....	88
6.3.1. Laboratório Incontrol.....	88
6.3.2. Método Gravimétrico de calibração.....	90
6.3.3. Carretel desenvolvido para inserção na linha de medição de vazão	91
6.4. Desenvolvimento do ensaio	92
6.4.1. Instalação do carretel na linha.....	92
6.4.2. Alinhamento dos transdutores	93
6.4.3. Aquisição de sinais sem fluxo	94

6.4.4. Aquisição de sinais com fluxo e medição de vazão	95
6.5. Testes e resultados	97
6.5.1. Sinais ultrassônicos.....	97
6.5.2. Resultado do ajuste de Zero	99
6.5.3. Resultado da medição de vazão	105
6.5.3.1. Medição 1	105
6.5.3.2. Medição 2.....	107
6.5.3.3. Medição 3.....	109
6.5.3.4. Medição 4.....	110
6.6. Análise de dados	112
6.6.1. Análises das medições de vazão	112
6.6.2. Análises da estimativa dos tempos de trânsito para as medições de vazão	112
6.6.3. Análises dos perfis de velocidade	115
6.7. Comentários e discussões.....	118
Capítulo 7 – Conclusão	119
7.1. Conclusões acerca do trabalho desenvolvido	119
7.2. Trabalhos realizados	122
7.3. Proposição para trabalhos futuros	122
Referência Bibliográfica.....	123
Apêndice I – Estudo de medição de vazão por Tempo de Trânsito.....	127
Anexo I.....	153
Anexo II.....	157

Figuras

Capítulo 1

FIGURA 1.1. TRANSDUTORES CLAMP ON – FONTE: HYDROVISION [13].....	4
FIGURA 1.2. TRANSDUTORES EM CARRETEL – FONTE: EMERSON [14]	4
FIGURA 1.3. TRANSDUTORES DE INSERÇÃO – FONTE: CAMERON [15].....	5
FIGURA 1.4. TIPOS DE TRAJETÓRIAS	6
FIGURA 1.5. POSIÇÃO DOS TRANSDUTORES TIPO CARRETEL	6
FIGURA 1.6. TIPOS DE ARRANJOS DE TRAJETÓRIAS.....	7
FIGURA 1.7. POSIÇÃO RELATIVA DOS TRANSDUTORES DE MEDIDOR ULTRASSÔNICO DE 3 CANAIS EM ARRANJO COM PLANOS CRUZADOS: FAURE HERMAN [18]	7
FIGURA 1.8. MEDIDOR DE 4 CANAIS EM PLANO ÚNICO: (DIREITA) POSICIONAMENTO DOS TRANSDUTORES; (ESQUERDA) VISTA EXTERNA – FONTE: CAMERON [14].....	8
FIGURA 1.9. MEDIDOR DE VAZÃO ULTRASSÔNICO DE OITO TRAJETÓRIAS EM PLANOS CRUZADOS (ESQUERDA), (DIREITA) CANAIS EM CORTE - FONTE: CAMERON [14].....	8
FIGURA 1.10. MEDIDORES DE VAZÃO ULTRASSÔNICOS DE 32 TRAJETÓRIAS – FONTE: METERING & TECHNOLOGY [21]	9
FIGURA 1.11. TECNOLOGIAS DE MEDIÇÃO DE VAZÃO - FONTE: FLOW RESEARCH INC. [21].....	9
FIGURA 1.12. PERSPECTIVA DE CRESCIMENTO - NOVAS TECNOLOGIAS	10
FIGURA 1.13. PERSPECTIVA DE CRESCIMENTO - TECNOLOGIAS TRADICIONAIS	10
FIGURA 1.14. TIPOS DE FLUIDOS ONDE SÃO APLICADOS MEDIDORES DE VAZÃO ULTRASSÔNICOS	11

Capítulo 2

FIGURA 2.1. (A) SEÇÃO TRANSVERSAL DO PERFIL DE VELOCIDADE NUMA LINHA DIAMETRAL PARA O FLUIDO GUIADO; (B) VELOCIDADE UNIFORME DO PERFIL DE ESCOAMENTO ATRAVÉS DE S NO FLUIDO GUIADO [1].	17
FIGURA 2.2. (A) SEÇÃO TRANSVERSAL DO PERFIL DE VELOCIDADE NUMA LINHA DIAMETRAL PARA O FLUIDO GUIADO; (B) VELOCIDADE PARABÓLICA DO PERFIL DE ESCOAMENTO ATRAVÉS DE S NO FLUIDO GUIADO [1].	17
FIGURA 2.3. (A) SEÇÃO TRANSVERSAL DO PERFIL DE VELOCIDADE NUMA LINHA DIAMETRAL PARA O FLUIDO GUIADO; (B) VELOCIDADE ELÍPTICO DO PERFIL DE ESCOAMENTO ATRAVÉS DE S NO FLUIDO GUIADO [1].	18
FIGURA 2.4. ESPECTRO ACÚSTICO DE FREQUÊNCIA [25].....	19
FIGURA 2.5. ONDAS LONGITUDINAIS	20
FIGURA 2.6. ONDAS TRANSVERSAIS	21
FIGURA 2.7. ONDAS SUPERFICIAIS	21
FIGURA 2.8. SINAL ULTRASSÔNICO TEÓRICO A PARTIR DE EQ. 2.26.....	23
FIGURA 2.9. SINAL ULTRASSÔNICO COM ENVELOPE GAUSSIANO.....	24
FIGURA 2.10. MODELO DE CONFIGURAÇÃO DE UM TRANSDUTOR PIEZOELÉTRICO	25
FIGURA 2.11. CAMPO SONORO – FONTE: OLYMPUS [30].....	28
FIGURA 2.12. CONFIGURAÇÃO DE POSIÇÕES DOS TRANSDUTORES EM CONDUTO [17]	29
FIGURA 2.13. PRINCÍPIO DO MÉTODO DE TEMPO DE TRÂNSITO.....	30
FIGURA 2.14. PROCESSO DE INTEGRAÇÃO NUMÉRICA PARA CÁLCULO DE VAZÃO	32
FIGURA 2.15. PERFIS DE VELOCIDADES EM CONDUTOS PARA OS MÉTODOS DE INTEGRAÇÃO [31]	34

Capítulo 3

FIGURA 3.1. DIAGRAMA DE BLOCOS DO MVU WESTINGHOUSE [33].....	37
FIGURA 3.2. DIAGRAMA DE BLOCO DE UM SISTEMA DE ULTRASSOM DA TEXAS INSTRUMENTS [34]	38
FIGURA 3.3. DIAGRAMA DE BLOCO PULSADOR/RECEPTOR	39
FIGURA 3.4. DIAGRAMA DE BLOCO DO MEDIDOR DE VAZÃO ULTRASSÔNICO (MVU)	41
FIGURA 3.5. (A)EXCITAÇÃO SPIKE E (B) EXCITAÇÃO QUADRADA.....	42
FIGURA 3.6. PADRÃO DO FEIXE MEDIDO DE UM TRANSDUTOR COM DIÂMETRO DE SAÍDA DE 2 CM EM UMA FREQUÊNCIA DE OPERAÇÃO DE 162 KHz [16]	43
FIGURA 3.7. AMPLIFICADORES A MOSFET: A) TOPOLOGIA CONVENCIONAL E B) TOPOLOGIA HALF BRIDGE OUTPUT [41].....	45
FIGURA 3.8. TOPOLOGIA TRANSFORMER PUSH-PULL.....	45
FIGURA 3.9. DIAGRAMA DE TEMPORIZAÇÃO DE CONTROLE DE PERIFÉRICOS	49
FIGURA 3.10. PCI DO PULSER.....	50
FIGURA 3.11. PCI DO HV SUPPLY	50
FIGURA 3.12. PCI DO MULTIPLEXADOR	51
FIGURA 3.13. PCI DO AGC	51
FIGURA 3.14. SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS.....	52
FIGURA 3.15. PRIMEIRA VERSÃO DO PROTÓTIPO	52
FIGURA 3.16. VERSÃO FINAL DO PROTÓTIPO	53

Capítulo 4

FIGURA 4.1. MEDIÇÃO DE TEMPO DE TRÂNSITO	54
FIGURA 4.2. DIAGRAMA DE BLOCO DE MEDIÇÃO DE TEMPO DE TRÂNSITO, REFERÊNCIA: WEBSTER [9].....	55
FIGURA 4.3. SINAIS EMITIDOS E RECEBIDOS	58
FIGURA 4.4. CORRELAÇÃO FEITA ENTRE $txe rx$	58
FIGURA 4.5. PROCESSO DE INTERPOLAÇÃO	59
FIGURA 4.6. RECEIVER DO MVU MOSTRANDO OS CANAIS A E B	62
FIGURA 4.7. FLUXOGRAMA DE ESTIMATIVA DE TOF.....	63
FIGURA 4.8. SINAL DE REFERÊNCIA.....	64
FIGURA 4.9. ALGORITMO DE PROCESSAMENTO DE TOF.....	64
FIGURA 4.10. ALGORITMO DE CÁLCULO DE VELOCIDADE MÉDIA AXIAL	66
FIGURA 4.11. ALGORITMO DE CÁLCULO DE VAZÃO	67
FIGURA 4.12. DIAGRAMA DE BLOCO DE AJUSTE DE GANHO DO AGC	68
FIGURA 4.13. ALGORITMO DE AJUSTE DE GANHO DO AGC.....	69

Capítulo 5

FIGURA 5.1. DIAGRAMA DE FUNCIONAMENTO DO MVU	71
FIGURA 5.2. DIAGRAMA DO PROCESSO DE CONFIGURAÇÃO DO MVU.....	72
FIGURA 5.3. DIAGRAMA DO PROCESSO DE CONEXÃO DO MVU	73
FIGURA 5.4. DIAGRAMA DO PROCESSO DE AJUSTE DE GANHO DO MVU.....	74
FIGURA 5.5. DIAGRAMA DO PROCESSO DE MEDIÇÃO DO MVU	76
FIGURA 5.6. ARQUITETURA DO SOFTWARE MVU	79
FIGURA 5.7. DIAGRAMA DE USO DO SOFTWARE MVU.....	80
FIGURA 5.8. TELA CONFIGURAÇÃO.....	80
FIGURA 5.9. EXEMPLO DA AÇÃO DE CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA.....	81
FIGURA 5.10. TELA GERAL	81
FIGURA 5.11. TELA CONTROLE	82
FIGURA 5.12. TELA AQUISIÇÃO.....	82

FIGURA 5.13. TELA TRANSDUTORES	83
FIGURA 5.14. TELA AS-BUILT	83
FIGURA 5.15. TELA TRAJETÓRIAS	84
FIGURA 5.16. TELA CONECTAR	84
FIGURA 5.17. TELA CALIBRAR	85
FIGURA 5.18. SINAL SEM GANHO	85
FIGURA 5.19. SINAL COM GANHO	86
FIGURA 5.20. TELA PRINCIPAL COM DADOS	86

Capítulo 6

FIGURA 6.1. INSTALAÇÃO DA INCONTROL	89
FIGURA 6.2. MÉTODO GRAVIMÉTRICO DE CALIBRAÇÃO - ISO 4185 [58]	91
FIGURA 6.3. CARRETEL DE TESTE EM LABORATÓRIO	92
FIGURA 6.4. CARRETEL COM OS TRANSDUTORES INSTALADOS	93
FIGURA 6.5. PROTÓTIPO EM TESTE	93
FIGURA 6.6. VÁLVULA DE INSTALAÇÃO DOS TRANSDUTORES	94
FIGURA 6.7. RESULTADOS DE MEDIÇÃO PELO MÉTODO GRAVIMÉTRICO	96
FIGURA 6.8. SINAIS ULTRASSÔNICOS DAS TRAJETÓRIAS 1 E 2	97
FIGURA 6.9. SINAIS ULTRASSÔNICOS DAS TRAJETÓRIAS 3 E 4	98
FIGURA 6.10. SINAIS ULTRASSÔNICOS DE RECEPÇÃO DAS TRAJETÓRIAS 1 E 2 AMPLIADAS	98
FIGURA 6.11. SINAIS ULTRASSÔNICOS DE RECEPÇÃO DAS TRAJETÓRIAS 3 E 4 AMPLIADAS	98
FIGURA 6.12. SINAL ULTRASSÔNICO DE REFERÊNCIA PARA A ESTIMATIVA DE ToF	99
FIGURA 6.13. PRIMEIRA MEDIÇÃO DE TEMPO DE TRÂNSITO DA TRAJETÓRIA 1 - SEM E COM TRATAMENTO DE OUTLIERS	100
FIGURA 6.14. SEGUNDA MEDIÇÃO DE TEMPO DE TRÂNSITO DA TRAJETÓRIA 1 - SEM E COM TRATAMENTO DE OUTLIERS	100
FIGURA 6.15. PRIMEIRA MEDIÇÃO DE TEMPO DE TRÂNSITO DA TRAJETÓRIA 2 - SEM E COM TRATAMENTO DE OUTLIERS	101
FIGURA 6.16. SEGUNDA MEDIÇÃO DE TEMPO DE TRÂNSITO DA TRAJETÓRIA 2 - SEM E COM TRATAMENTO DE OUTLIERS	101
FIGURA 6.17. PRIMEIRA MEDIÇÃO DE TEMPO DE TRÂNSITO DA TRAJETÓRIA 3 - SEM E COM TRATAMENTO DE OUTLIERS	102
FIGURA 6.18. SEGUNDA MEDIÇÃO DE TEMPO DE TRÂNSITO DA TRAJETÓRIA 3 - SEM E COM TRATAMENTO DE OUTLIERS	102
FIGURA 6.19. PRIMEIRA MEDIÇÃO DE TEMPO DE TRÂNSITO DA TRAJETÓRIA 4 - SEM E COM TRATAMENTO DE OUTLIERS	103
FIGURA 6.20. SEGUNDA MEDIÇÃO DE TEMPO DE TRÂNSITO DA TRAJETÓRIA 4 - SEM E COM TRATAMENTO DE OUTLIERS	103
FIGURA 6.21. PRIMEIRA MEDIÇÃO DE VAZÃO SEM TRATAMENTO DE OUTLIERS	106
FIGURA 6.22. PRIMEIRA MEDIÇÃO DE VAZÃO COM TRATAMENTO DE OUTLIERS	107
FIGURA 6.23. SEGUNDA MEDIÇÃO DE VAZÃO SEM TRATAMENTO DE OUTLIERS	108
FIGURA 6.24. SEGUNDA MEDIÇÃO DE VAZÃO COM TRATAMENTO DE OUTLIERS	108
FIGURA 6.25. TERCEIRA MEDIÇÃO DE VAZÃO SEM TRATAMENTO DE OUTLIERS	109
FIGURA 6.26. TERCEIRA MEDIÇÃO DE VAZÃO COM TRATAMENTO DE OUTLIERS	110
FIGURA 6.27. QUARTA MEDIÇÃO DE VAZÃO SEM TRATAMENTO DE OUTLIERS	111
FIGURA 6.28. QUARTA MEDIÇÃO DE VAZÃO COM TRATAMENTO DE OUTLIERS	111
FIGURA 6.29. PERFIL DE VELOCIDADE ESTIMADO PELO ALGORITMO DE VELOCIDADE – MEDIÇÃO 1	115
FIGURA 6.30. PERFIL DE VELOCIDADE ESTIMADO PELO ALGORITMO DE VELOCIDADE – MEDIÇÃO 2	115
FIGURA 6.31. PERFIL DE VELOCIDADE ESTIMADO PELO ALGORITMO DE VELOCIDADE – MEDIÇÃO 3	116
FIGURA 6.32. PERFIL DE VELOCIDADE ESTIMADO PELO ALGORITMO DE VELOCIDADE – MEDIÇÃO 4	116
FIGURA 6.33. PERFIL DE VELOCIDADE COM ALTERAÇÃO DA TRAJETÓRIA 2 – MEDIÇÃO 1	117

FIGURA 6.34. PERFIL DE VELOCIDADE COM ALTERAÇÃO DA TRAJETÓRIA 2 – MEDIÇÃO 2	117
---	-----

Tabelas

Capítulo 2

TABELA 2.1. COEFICIENTES DE PONDERAÇÃO PARA 4 E 9 TRAJETÓRIAS NO PLANO	35
--	----

Capítulo 6

TABELA 6.1. COMPRIMENTO DAS TRAJETÓRIAS ACÚSTICAS	91
TABELA 6.2. VALORES DE CORREÇÃO DE TEMPO DE TRÂNSITO TRAJETÓRIA 1	104
TABELA 6.3. VALORES DE CORREÇÃO DE TEMPO DE TRÂNSITO TRAJETÓRIA 2	104
TABELA 6.4. VALORES DE CORREÇÃO DE TEMPO DE TRÂNSITO TRAJETÓRIA 3	104
TABELA 6.5. VALORES DE CORREÇÃO DE TEMPO DE TRÂNSITO TRAJETÓRIA 4	105
TABELA 6.6. CORREÇÕES DE ZERO PARA TRAJETÓRIAS	105
TABELA 6.7. ERROS RELATIVOS ENTRE MEDIÇÕES DO LABORATÓRIO E DO PROTÓTIPO.....	112
TABELA 6.8. QUADRO DE TEMPO DE TRÂNSITO NAS MEDIÇÕES DE VAZÃO PARA TRAJETÓRIA 1.....	113
TABELA 6.9. QUADRO DE TEMPO DE TRÂNSITO NAS MEDIÇÕES DE VAZÃO PARA TRAJETÓRIA 2.....	113
TABELA 6.10. QUADRO DE TEMPO DE TRÂNSITO NAS MEDIÇÕES DE VAZÃO PARA TRAJETÓRIA 3.....	113
TABELA 6.11. QUADRO DE TEMPO DE TRÂNSITO NAS MEDIÇÕES DE VAZÃO PARA TRAJETÓRIA 4.....	114
TABELA 6.12. VELOCIDADE AXIAL MÉDIA POR TRAJETÓRIA PARA AS 4 MEDIÇÕES	115

Capítulo 1 - Introdução

Uma das grandezas mais medidas nos processos industriais é a vazão de um fluido [1]. A importância de medir essa grandeza está relacionada à característica de essa medida afetar outras grandezas envolvidas no escoamento de um fluido, tais como pressão, nível, temperatura e teor químico [2]. Os campos de aplicações de medidores de vazão são muitos, desde aplicações simples, com baixa exigência de exatidão, como medição de vazão em residências, até medições que exijam grande desempenho e alta exatidão, como em aplicações envolvendo transferência de custódia de gases e líquidos derivados do petróleo.

A medição de vazão requer normalmente um instrumento específico de medição que apresenta uma classe de exatidão entre 0,2 % e 5 % [1]. Outro detalhe importante a se destacar é a variedade de tipos de medidores de vazão disponíveis no mercado, cada um possuindo características distintas de princípio de funcionamento. Segundo Pereira [1], a escolha de um tipo de medidor de vazão depende de alguns fatores relevantes, entre eles: exatidão desejada para a medição; conhecimento do fluido medido e suas características; condições termodinâmicas; espaço físico disponível para inserção do medidor; fator financeiro; entre outros. Com o avanço da eletrônica nas últimas décadas, novas tecnologias [3] vêm ganhando destaque no mercado de medição de vazão. Uma tendência comum de produtos comercializados pelas empresas especializadas é ter versões de medidores de fluxo inteligentes que se adaptam à variação do fluido no momento da medição. Estes medidores inteligentes possuem diversas funções (auto teste, auto calibração, auto range, auto identificação, capacidade de adaptação, de armazenamento e tratamento de dados históricos, entre outros) que maximizam a eficiência da medição e minimizam erros relacionados a ruídos, vibrações, sedimentos nos fluidos e má instalação do equipamento, compensando-os e aumentando a confiabilidade da medição.

Dando ênfase a um tipo de medidor de vazão, os medidores de vazão ultrassônicos são o destaque das últimas duas décadas. Eles são robustos, atingem classes de exatidão mais rigorosas (faixa de 0,1 a 1 %), são capazes de medir grandes vazões, sua instalação e retirada nos processos de medição são relativamente fáceis de serem feitas e apresentam grande flexibilidade quanto ao fluido a ser medido e às condições de operação [4]. O

medidor ultrassônico utiliza tecnologia de ponta em instrumentação eletrônica, processamento de sinais e dinâmicas dos fluidos, acarretando um grande potencial de mercado para novos desenvolvimentos tecnológicos.

Dois princípios de medição ultrassônica merecem destaque: *Doppler* e Tempo de Trânsito (*Transit Time*). O medidor de vazão ultrassônico a efeito *Doppler* mede a vazão através da variação de frequência de ecos ultrassônicos emitidos pelo transdutor ultrassônico, que ao serem refletidos pelas bolhas ou sólidos contidos no líquido, retornam ao transdutor ultrassônico com frequência alterada [5]. Enquanto o medidor de vazão ultrassônico pelo método *Transit Time* mede a vazão através da diferença entre o tempo que o pulso ultrassônico leva ao se propagar a favor do escoamento e o tempo ao se propagar contra o escoamento [6]. Os dois princípios de medição são aplicáveis em tipos de fluidos diferentes, porém uma técnica obtém vantagens sobre a outra. Os medidores de vazão a efeito *Doppler* trabalham melhor em líquidos contendo partículas ou bolhas como águas residuais, ao passo que os medidores de vazão pela técnica de *Transit Time* são aplicados em líquidos limpos como a água, óleos e produtos químicos [4]. Uma nova tendência tecnológica são medidores de vazão ultrassônicos que possuem uma medição híbrida entre os dois princípios, *Doppler* e *Transit Time*, fazendo com que uma técnica compense a desvantagem da outra [7].

A técnica *Transit Time* é a mais empregada em medidores de vazão ultrassônicos, principalmente quando as medições exigem incertezas máximas de 0,5 %. Isso se deve ao fato de esses medidores terem grande robustez e exatidão. Um exemplo de indústria que utiliza esses tipos de medidores de vazão é a do petróleo. Devido às suas características, esses tipos de medidores podem ser utilizados na medição fiscal e de transferência de custódia, pois seguem a exigência de erro mínimo de 0,2 % da OIML R-117 (2007) [8] na medição de vazão de líquidos, e de 0,5 % da OIML R-137 (2006) [9] na medição de vazão de gás natural [4].

É importante salientar que este presente documento relata o desenvolvimento de um Medidor de Vazão Ultrassônico (MVU) baseado na técnica de Tempo de Trânsito e o principal fluido a ser especificado como meio é a água.

1.1. Estado da Arte

1.1.1. Medidor de Vazão Ultrassônico por Tempo de Trânsito

A tecnologia ultrassônica de Tempo de Trânsito foi patenteada por Rütgen em 1928, mas apenas 40 anos mais tarde o medidor de vazão ultrassônico conseguiu atingir uma incerteza aceitável pela indústria. Os primeiros instrumentos apareceram na década de 60, em uma configuração simples, com apenas uma trajetória passando pelo centro da tubulação [10]. Também nesta mesma década, Knapp, 1964 [11], sugeriu um método de medição de vazão multi-cordal por Quadratura Gaussiana, surgindo o conceito de medições de vazão utilizando mais trajetórias acústicas. Esta ideia se desenvolveu e, na década de 70, os primeiros equipamentos foram fabricados pela *Westinghouse and ORE*. Também na década de 70, os primeiros medidores *clamp-on* foram comercializados nos Estados Unidos [12]. Utilizados inicialmente na medição de água, os medidores ultrassônicos começaram a ter expressão na indústria do petróleo, na medição de vazão de óleo e gás nos anos 80 e, ao melhorarem seu desempenho, passaram a ser comercializados em larga escala na década de 90. O desenvolvimento da eletrônica e das simulações computacionais de dinâmicas de fluidos nas últimas duas décadas fez com que o desenvolvimento destes medidores aumentasse, resultando na melhoria na medição de vazão e no crescimento comercial destes equipamentos. Em meados dos anos 2000 surgem os medidores de vazão inteligentes capazes de fazer autoajustes e autoanálise dos perfis de medição. Em 2008, 57 % dos medidores ultrassônicos comercializados no mundo eram medidores de gás, e 41 %, de líquidos [3].

1.1.2. Tipos de medidores de vazão por tempo de trânsito

Os medidores de vazão por Tempo de Trânsito são divididos em três tipos: *clamp-on* (ou tipo braçadeira); tipo carretel; e de inserção. Esta divisão está relacionada à forma com que os transdutores ultrassônicos são fixados no conduto de medição e se os mesmos estão ou não em contato com o fluido.

Os *clamp-on* ou medidores tipo braçadeira (transdutores fixados externamente ao conduto), mostrados na Figura 1.1, surgiram no Japão em 1964, inicialmente aplicados em condutos de 0,3 até 1 m de diâmetro, anos depois em diâmetros inferiores à 0,3 m e atualmente são aplicados na área médica para medição de fluxo em vasos sanguíneos

[12]. A principal característica deste tipo de medidores é a facilidade de instalação, uma vez que não é necessário despressurizar ou furar o conduto para instalação do medidor. Atualmente, atingem bons níveis de precisão, em torno de 0,5 %, dependendo do modo e o local de instalação.

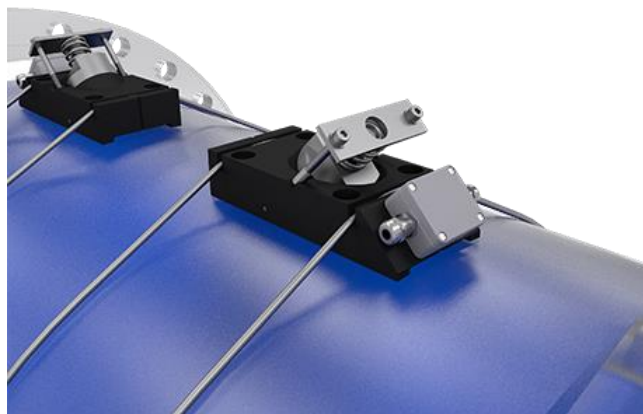


Figura 1.1. Transdutores clamp on – Fonte: HydroVision [13]

Os medidores tipo carretel são medidores cujos transdutores ultrassônicos fazem parte de uma estrutura fixa montada, como mostrado na Figura 1.2. São os mais comercializados em processos industriais devido ao fato de serem instalados diretamente nos condutos. Isso também se torna sua principal desvantagem, pois é necessário interromper o processo de escoamento para instalar o medidor. Em contrapartida, são os medidores que atingem melhores precisões, inclusive inferiores a 0,5 %, dependendo do arranjo de trajetórias acústicas.



Figura 1.2. Transdutores em carretel – Fonte: Emerson [14]

Os medidores tipo inserção possuem transdutores ultrassônicos e um transfixador para acoplar o transdutor ao conduto de medição, como mostrado na Figura 1.3. Estes transdutores permanecem em contato com o fluido e são utilizados principalmente em condutos de grandes diâmetros, superiores a 2 m, facilitando a instalação de um sistema de medição de vazão. Alguns processos de instalação não necessitam a despressurização do duto de inserção.



Figura 1.3. Transdutores de inserção – Fonte: Cameron [15]

1.1.3. Medidor de vazão de uma trajetória acústica

O medidor de vazão de uma trajetória acústica consiste em um medidor com apenas dois transdutores associados à medição. São aplicados em medições de vazão em dutos com diâmetros menores, devido ao fato de serem muito sensíveis ao perfil de velocidade do escoamento [16]. Grande parte das aplicações desses medidores envolvem transdutores ultrassônicos do tipo *clamp-on* e carretel de pequenos diâmetros.

Segundo a ABNT/ISO 12765 [16], as instalações dos transdutores no duto podem ser feitas no mesmo lado da tubulação ou em lados opostos possuindo trajetórias diretas e indiretas (com reflexão com a parede do duto), como na Figura 1.4. Os tipos de trajetórias indiretas mais comuns são em “V” (uma reflexão com o duto) e em “W” (Três reflexões com o duto). Outro detalhe importante é o fato de o tipo de trajetória poder ser diametral, passando pelo centro do duto, ou corda, passando por trajetória diferente da diametral.

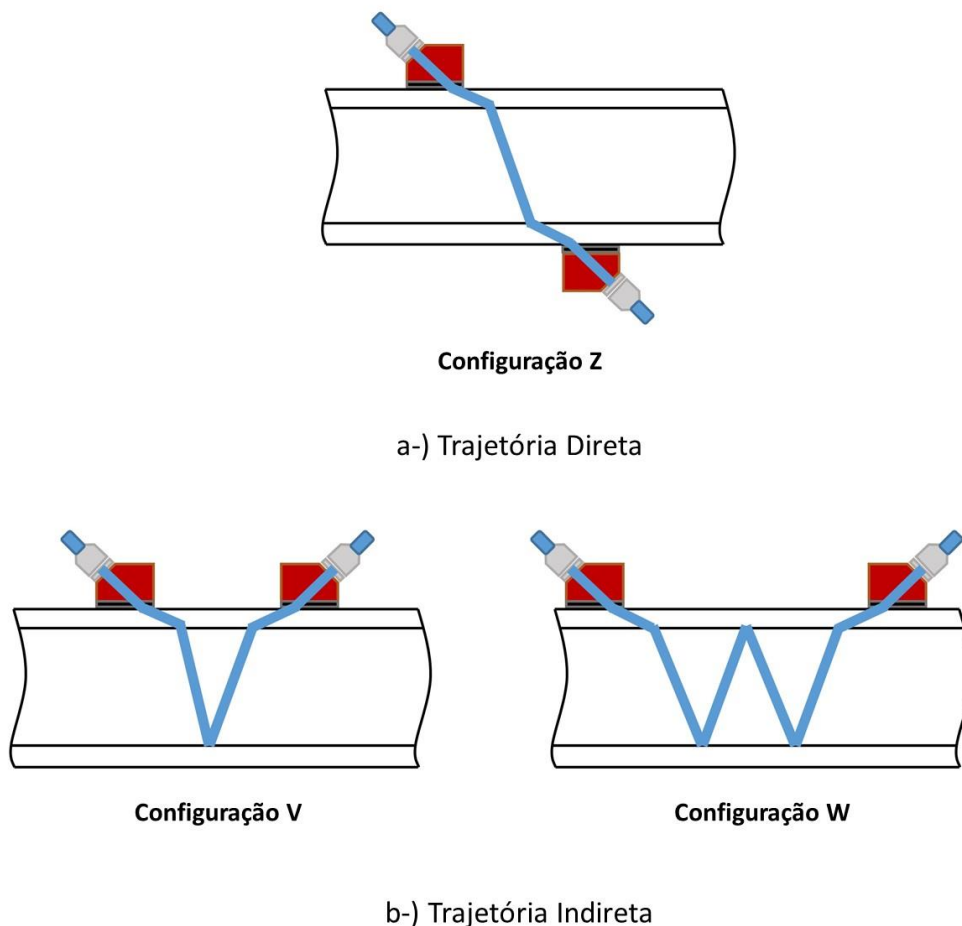


Figura 1.4. Tipos de trajetórias

Em relação aos transdutores tipo carretel, a ABNT/ISO 12765 define o tipo de posicionamento do transdutor em referência ao contato com o fluido, como os da Figura 1.5. Essas diferenças de posicionamento dos transdutores influenciam na medição. Para transdutores retraídos, os tubos apresentam um local vago para depósito de sedimentos que podem prejudicar a propagação de onda ultrassônica, além de aumentarem o comprimento da trajetória acústica. Os transdutores intrusivos causam uma saliência no duto provocando mudanças no perfil de propagação do fluxo e interferindo nas medições [16]. O modo mais adequado de posicionamento é o faceado com o tubo.

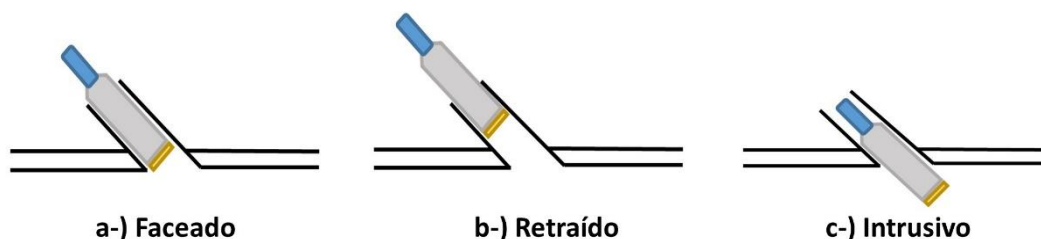


Figura 1.5. Posição dos transdutores tipo carretel

1.1.4. Medidor de Vazão de Múltiplas Trajetórias

Os medidores de vazão de múltiplas trajetórias (multi-trajetórias ou multicanais) possuem duas ou mais trajetórias acústicas. Este tipo de medidor possui menor sensibilidade ao perfil de velocidade, devido ao fato de cobrirem uma maior porção da seção transversal e agregar mais informações [17].

Os números de canais definem o tipo de arranjos das trajetórias. Conforme mostrado na Figura 1.6, os canais podem ser cruzados ou paralelos [16]. Para os casos de serem paralelas, as distâncias entre trajetórias podem ser assimétricas ou simétricas entre elas [16].

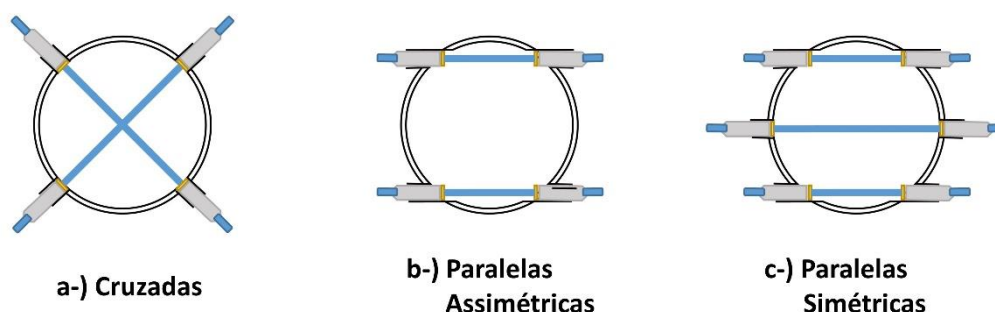


Figura 1.6. Tipos de arranjos de trajetórias

O esquema da Figura 1.7 mostra a posição relativa dos transdutores de um medidor ultrassônico de três canais. As trajetórias são paralelas e, se rebatidas na seção transversal, seguem o desenho (c) da Figura 1.6.

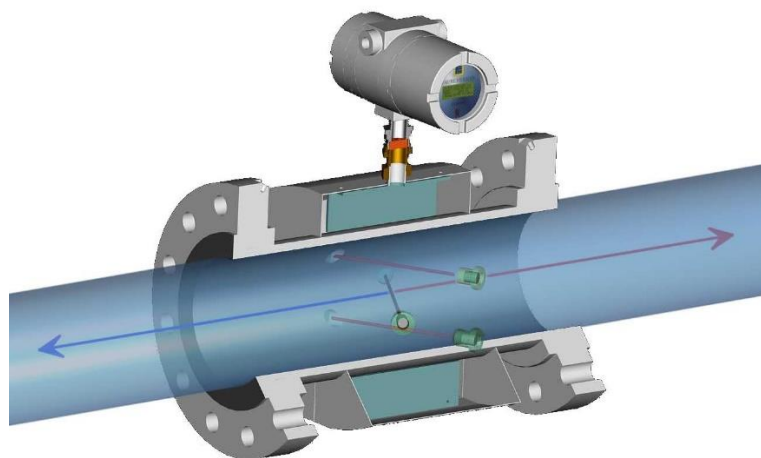


Figura 1.7. Posição relativa dos transdutores de medidor ultrassônico de 3 canais em arranjo com planos cruzados: Faure Herman [18]

Alguns medidores também apresentam as trajetórias em um único plano, como na Figura 1.8 e também podem possuir mais que um plano, como mostrado na Figura 1.9. Para medidores com mais planos as trajetórias de mesmo posicionamento em relação ao tubo geralmente são cruzadas entre si.



Figura 1.8. Medidor de 4 canais em plano único: (direita) posicionamento dos transdutores; (esquerda) vista externa – Fonte: Cameron [14]

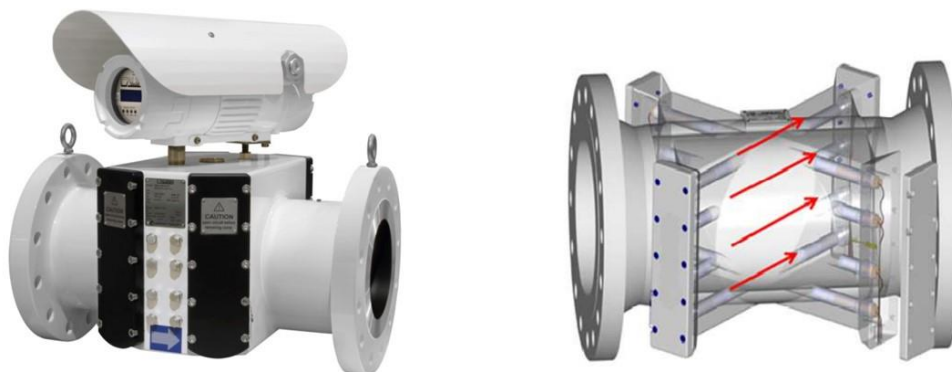


Figura 1.9. Medidor de Vazão Ultrassônico de oito trajetórias em planos cruzados (esquerda), (direita) canais em corte - Fonte: Cameron [14]

Outros arranjos para medidores ultrassônicos aparecem na literatura, como o triângulo duplo, a estrela de cinco pontas [19] ou o arranjo assimétrico [20]. Alguns modelos de Medidores de Vazão Ultrassônicos da empresa *Metering & Technology* possuem arranjos de 15 e 32 trajetórias [21] distribuídas conforme a Figura 1.10. Este tipo de tecnologia permite traçar perfis de fluxo em 3D.

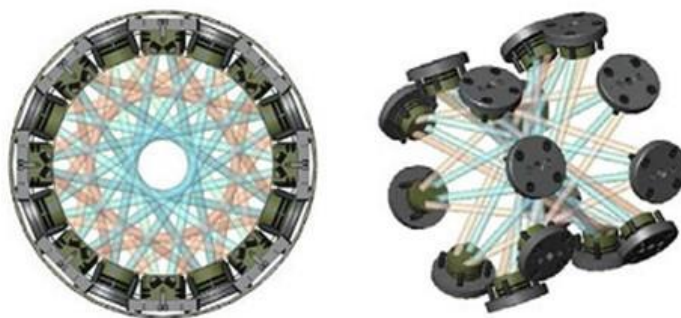


Figura 1.10. Medidores de Vazão Ultrassônicos de 32 trajetórias – Fonte: Metering & Technology [21]

1.2. Análise de Mercado

Segundo um estudo realizado pela *Flow Research Inc.* [22], o mercado mundial de medidores de vazão em 2011 foi de, aproximadamente, USD 5,7 bilhões, envolvendo todas as tecnologias de medição de vazão disponíveis no mercado. O estudo em si mostra de forma detalhada as principais tecnologias de medição de vazão, onde elas são mais aplicadas no mercado mundial e qual tipo de tecnologia cada setor industrial absorve. O estudo divide em 3 partes as tecnologias de medidores de vazão: Tecnologias Tradicionais; Novas Tecnologias; e Tecnologias Emergentes, como na Figura 1.11.

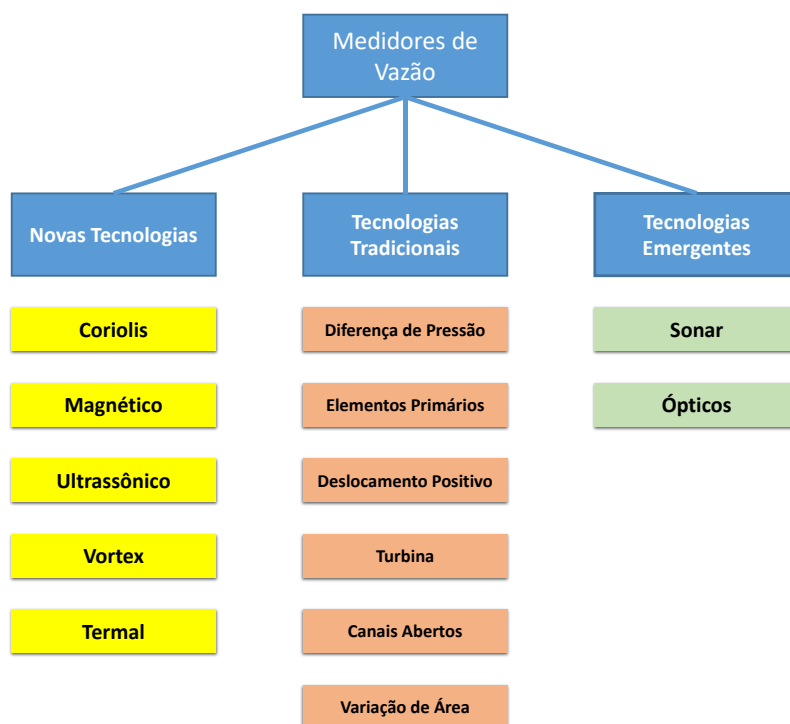


Figura 1.11. Tecnologias de medição de vazão - Fonte: Flow Research Inc. [21]

Estudos mais recentes realizados pela mesma instituição apontam que o mercado global de Novas Tecnologias de medidores de vazão vai ultrapassar USD 5,7 bilhões em 2018, ao passo que as Tecnologias Tradicionais ficarão em USD 3,3 bilhões no mesmo ano. Estes resultados são discutidos em *Flow Research's Volume X: The World Market for Flowmeters, 5th Edition* [22]. A Figura 1.12 aponta o crescimento de mercado das Novas Tecnologias e a Figura 1.13 mostra o crescimento de mercado para as Tecnologias Tradicionais.

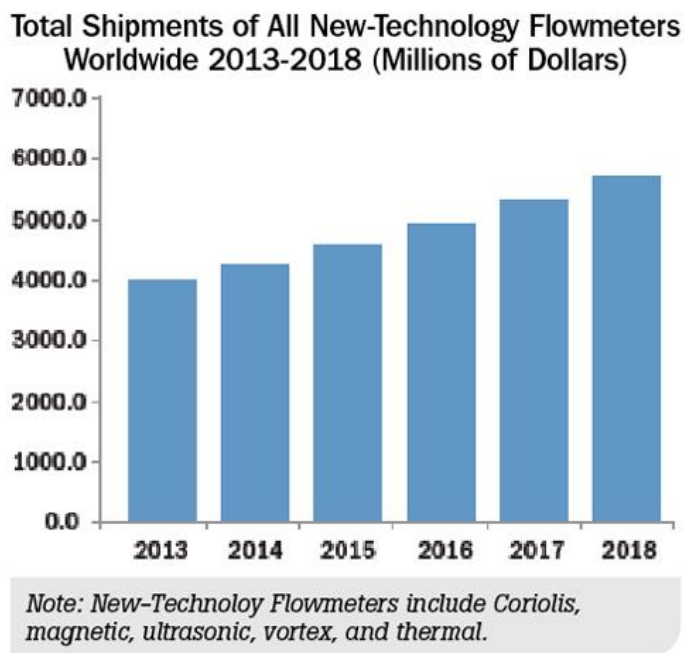


Figura 1.12. Perspectiva de Crescimento - Novas Tecnologias

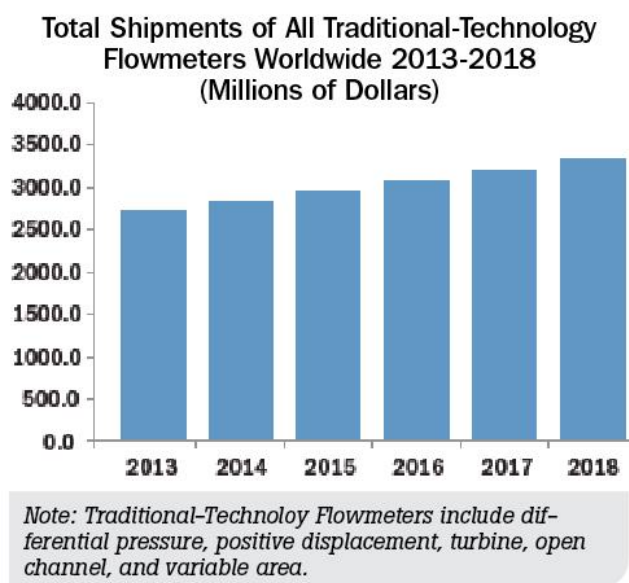


Figura 1.13. Perspectiva de Crescimento - Tecnologias Tradicionais

O mercado de medidores de vazão ultrassônicos totalizou um comércio de USD 632 milhões em 2011, e a previsão de crescimento a uma taxa composta anual é de, aproximadamente, 9,6 por cento até 2018 [22]. Este crescimento é impulsionado pelo uso de medidores de vazão ultrassônicos em aplicações de transferência de custódia e pelo desenvolvimento de medidores de vazão multi-trajetórias, aumentando a confiabilidade das medições de vazão. Os medidores ultrassônicos em linha (ou tipo carretel) representam dois terços das receitas, sendo o restante dividido entre os medidores de *clamp-on* e de inserção. Além do fluxo de gás, os medidores de vazão ultrassônicos são usados para medir o fluxo de petróleo e líquidos não derivados do petróleo, como apresentado na Figura 1.14.

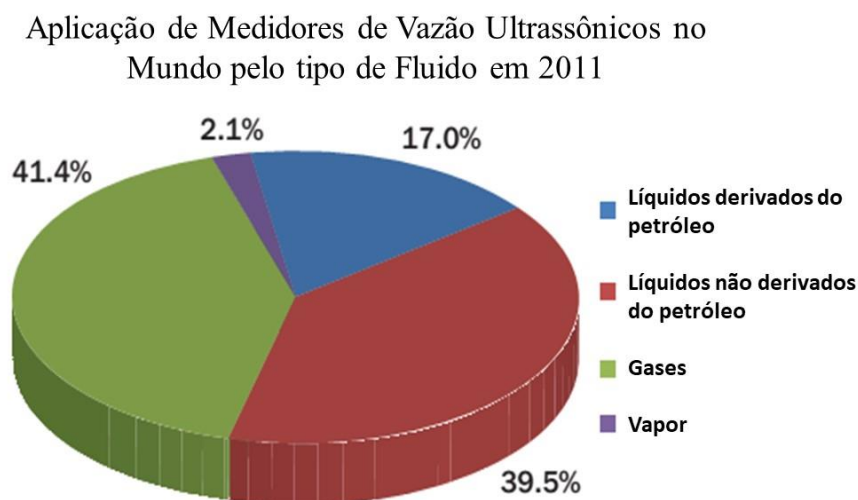


Figura 1.14. Tipos de Fluidos onde são aplicados Medidores de Vazão Ultrassônicos

No Brasil, este mercado é aplicado principalmente em empresas de extração de petróleo e gás, bem como em sistemas hidráulicos de grandes diâmetros (superiores a 2 metros). O mercado brasileiro vem crescendo, devido principalmente às mudanças na norma IEC 60041 [17] (responsável por regulamentar processos de medição de vazão aplicados a sistemas hidrelétricos). Estas modificações colocam o método ultrassônico de medição de vazão como um método primário de medições de vazão em instalações hidráulicas de grandes diâmetros. Como a matriz energética brasileira, em sua grande parte, é baseada em hidrelétricas, a tendência é um consumo maior destes tipos de medidores.

1.3. Objetivo

Esta dissertação tem o objetivo de descrever o desenvolvimento de um sistema de medição de vazão ultrassônico multi-trajetórias capaz de medir vazão de fluidos em grandes condutos fechados. A proposta do desenvolvimento é um sistema de medição capaz de controlar até oito trajetórias acústicas dispostas em uma configuração paralela e distribuídas em dois planos de medição. Para este desenvolvimento, focou-se em medições de vazão tendo como fluido a água. Os principais objetivos destacados no presente documento são:

- Estudo das características dos medidores de vazão ultrassônicos;
- Estudo e desenvolvimento da eletrônica do protótipo de um medidor de vazão ultrassônico;
- Desenvolvimento dos algoritmos de cálculos de vazão;
- Experimentação teórica e laboratorial do protótipo desenvolvido;
- Demonstração dos primeiros resultados obtidos no desenvolvimento do protótipo do medidor de vazão.

1.4. Distribuição do trabalho

A estrutura deste documento é apresentada a seguir.

No segundo capítulo é descrito o contexto teórico envolvendo a medição de vazão através da técnica ultrassônica de multi-trajetórias, abordando a literatura técnica e normativa envolvida na prática de medição desta tecnologia.

No terceiro capítulo é apresentado um estudo sobre a eletrônica do medidor de vazão; a descrição da eletrônica proposta no desenvolvimento do protótipo e, como resultado, o protótipo desenvolvido.

No quarto capítulo são propostos os métodos de processamento digital de sinais e os algoritmos de cálculos de vazão do medidor de vazão, assim como os resultados simulados dos cálculos de medição de vazão, baseando-se em resultados de medição em campo.

O quinto capítulo apresenta o *software* desenvolvido para o medidor de vazão ultrassônico.

No sexto capítulo são expostos os resultados de medição em laboratório especializado em calibração de medidores de vazão.

No sétimo capítulo são apresentadas as conclusões referentes a este trabalho, bem como as sugestões para trabalhos futuros.

O apêndice I descreve um estudo sobre os fundamentos teóricos de medição de vazão pela técnica de tempo de trânsito.

O anexo I apresenta os gráficos *boxplot* dos tempos de trânsitos obtidos nas medições feitas no laboratório de calibração de medidores de vazão. Os gráficos apresentados mostram os tempos de trânsito *up* e *down* para cada trajetória acústica de cada medição de vazão.

O anexo II apresenta o artigo publicado na X Conferência de Pequenas Centrais Hidrelétricas – Mercado e Meio Ambiente, com o Título de *Desenvolvimento de um Medidor de Vazão Ultrassônico de Multi-Trajelórias por Tempo de Trânsito*.

Capítulo 2 – Contexto Teórico

2.1. Conceitos de Dinâmicas dos Fluidos

2.1.1. Tipos de conduto

Tendo em vista a pressão de funcionamento, os condutos hidráulicos podem ser classificados em [24]:

a) **Condutos forçados:** nos quais a pressão interna é diferente da pressão atmosférica. Nesse tipo de conduto, as seções transversais são sempre fechadas e o fluido circulante as enche completamente. O movimento pode se efetuar em qualquer sentido do conduto;

b) **Condutos livres:** nestes, o líquido escoante apresenta superfície livre, na qual atua a pressão atmosférica. A seção não apresenta necessariamente perímetro fechado e, quando isto ocorre, para satisfazer a condição de superfície livre, a seção transversal funciona parcialmente cheia. O movimento se faz no sentido decrescente das cotas topográficas.

2.1.2. Classificação dos movimentos ou escoamentos

A classificação dos escoamentos depende da velocidade e está sujeita ao comportamento das moléculas do fluido que adotam um padrão de movimento denominado estrutura interna. Segundo Reynolds [24], o escoamento pode ser classificado em três tipos:

a) **Regime laminar:** é o tipo de escoamento no qual existe um mínimo de agitação das várias camadas do fluido. As diferentes seções do fluido se deslocam em planos paralelos, ou em círculos concêntricos coaxiais (quando num tubo cilíndrico), sem se misturar. Um escoamento laminar é definido como um escoamento em que o vetor velocidade é aproximadamente constante em cada ponto do fluido.

b) **Regime de transição:** está relacionado ao processo de transição entre o regime laminar e turbulento.

c) Regime turbulento: Ocorre quando as partículas de um fluido não se movem ao longo de trajetórias bem definidas, ou seja, as partículas descrevem trajetórias irregulares, com movimento aleatório, produzindo uma transferência de quantidade de movimento entre regiões de massa líquida. Este escoamento é comum na água e gases, cujas viscosidades são relativamente baixas.

O número de Reynolds (abreviado como Re) é um número adimensional usado na mecânica dos fluídos para o cálculo do regime de escoamento de determinado fluido dentro de um tubo ou sobre uma superfície. O seu significado físico é um quociente entre as forças de inércia e as forças de viscosidade:

$$Re = \frac{\overline{\rho \cdot v_{ax}} \cdot D}{\mu} \quad (Eq. 2.1)$$

onde: ρ é massa específica do fluido; μ é a viscosidade dinâmica do fluido; $\overline{v_{ax}}$ é a velocidade média do escoamento; e D é o comprimento representativo, que no caso de um conduto é o diâmetro. As faixas do número de Reynolds para cada regime em um conduto fechado são:

Re < 2000 – o regime é considerado laminar

2000 < Re < 4000 – o regime é considerado de transição

Re > 4000 – o regime é considerado turbulento

2.1.3. Viscosidade de fluidos

A viscosidade é uma resistência que o fluido apresenta ao escoamento. Esta resistência é definida como o atrito interno resultante do movimento de uma camada de fluido em relação à outra [24].

A **viscosidade dinâmica**, ou absoluta, é indicada pela letra μ , e é dada em termos de força requerida para mover uma unidade de distância, unidade [Pa.s]. Também é utilizada a unidade [poise], que corresponde a 0,1 Pa.s.

A **viscosidade cinemática (v)** é a relação entre a viscosidade dinâmica e a massa específica (ρ)

$$v = \frac{\mu}{\rho} \quad (Eq. 2.2)$$

Para a água, v é da ordem de $1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$; e, para o ar, da ordem de $1,5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ (ambas a 20°C).

2.1.4. Descarga de massa e vazão volumétrica

a) **Descarga de massa ou vazão mássica (\dot{m})** é definida como a quantidade de massa que atravessa a superfície de controle na unidade de tempo ($[\dot{m}] = \text{kg}/\text{s}$), como indicado em:

$$\dot{m} = \frac{dm}{dt} \quad (\text{Eq. 2.3})$$

$$\dot{m} = \int_A \rho \vec{V} \cdot d\vec{A} \quad (\text{Eq. 2.4})$$

b) **Vazão volumétrica (Q_v)** é definida como a relação entre o volume de fluido que atravessa uma superfície e o tempo gasto para atravessá-la ($[Q_v] = \text{m}^3/\text{s}$), definido por:

$$Q_v = \frac{d\text{vol}}{dt} \quad (\text{Eq. 2.5})$$

$$Q_v = \int_A \vec{V} \cdot d\vec{A} \quad (\text{Eq. 2.6})$$

2.1.5. Perfis de velocidade

A literatura consultada [1] mostra quatro casos diferentes de perfis de velocidade. O perfil de velocidade de um fluido depende essencialmente do número de Reynolds.

a) **Perfil de velocidade uniforme:** Neste caso, o perfil de velocidade do líquido é constante em toda seção transversal (S) e é representado pelas setas provenientes no duto circular (Figura 2.1-a). Uma vez que a velocidade é constante através de uma linha diametral em S, tem-se um perfil retangular de perfil de velocidade (Figura 2.1-b). O valor da vazão volumétrica é dado por:

$$Q_v = V \cdot A = V \cdot \pi \cdot \frac{D^2}{4} \quad (\text{Eq. 2.7})$$

onde, V representa a amplitude de velocidade; A é a área; e D é o diâmetro do tubo.

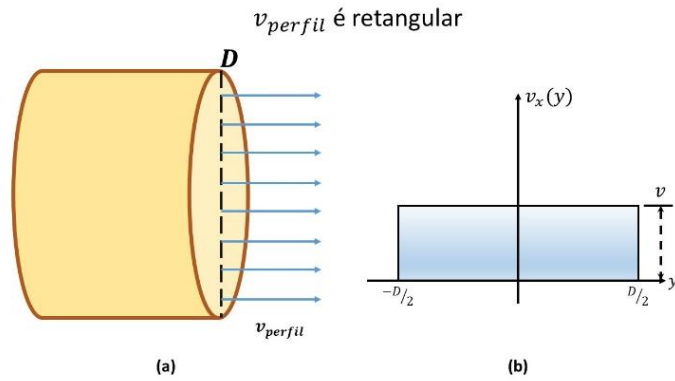


Figura 2.1. (a) Seção transversal do perfil de velocidade numa linha diametral para o fluido guiado; (b) Velocidade uniforme do perfil de escoamento através de S no fluido guiado [1].

b) Perfil de velocidade parabólico: Neste caso, a velocidade do líquido é variável em S e é representada pelas setas provenientes do conduto. A velocidade é maior na parte interna do duto e quase zero perto de sua periferia (Figura 2.2-a). Este tipo de escoamento tem um perfil de velocidade parabólico (Figura 2.2-b). Usando a equação da curva parabólica, obtém-se:

$$v_x(y) = v_{x\max} \cdot \left(1 - \frac{4}{D^2} \cdot y^2\right) \quad (\text{Eq. 2.8})$$

Aplicando a definição de vazão volumétrica de (Eq. 2.6), é possível obter o valor médio de amplitude do vetor velocidade e o fluxo volumétrico dado por:

$$\bar{v}_{ax} = \frac{2}{3} \cdot v_{x\max} \quad (\text{Eq. 2.9})$$

$$Q_v = \frac{\bar{v}_{ax} \cdot \pi \cdot D^4}{4} \quad (\text{Eq. 2.10})$$

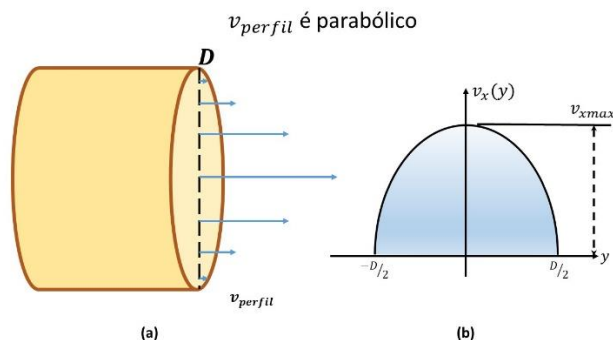


Figura 2.2. (a) Seção transversal do perfil de velocidade numa linha diametral para o fluido guiado; (b) Velocidade parabólica do perfil de escoamento através de S no fluido guiado [1].

c) Perfil de velocidade elíptica: Neste caso, a velocidade também é variável em S, e seu valor é maior na parte interna do duto do fluido e quase zero perto de sua periferia.

No entanto, nas aproximações elípticas, a razão entre a vazão máxima e as intensidades médias é menor. A Figura 2.3-a representa um perfil de velocidade elíptico, representado por setas, num duto de fluido com seção circular; e a Figura 2.3-b representa a variação de velocidade ao longo de uma linha diametral contida no duto do fluido. Usando a equação da curva elíptica, obtém-se:

$$v_x(y) = v_{x\max} \sqrt{1 - \left(\frac{y}{D/2}\right)^2} \quad (\text{Eq. 2.11})$$

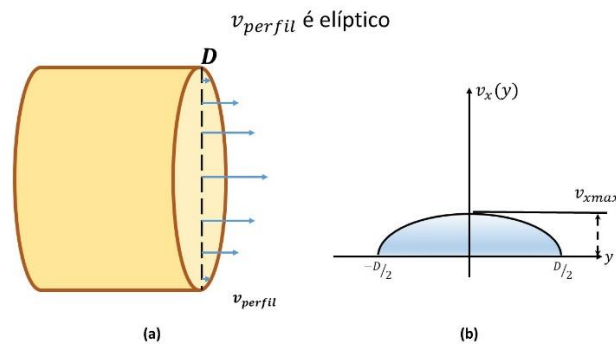


Figura 2.3. (a) Seção transversal do perfil de velocidade numa linha diametral para o fluido guiado; (b) Velocidade elíptica do perfil de escoamento através de S no fluido guiado [1].

Aplicando a definição de vazão volumétrica, é possível obter a amplitude média do vetor velocidade do escoamento, e é dado por:

$$\bar{v}_{ax} = \frac{\pi}{4} \cdot v_{x\max} \quad (\text{Eq. 2.12})$$

$$Q_v = \left(\frac{\pi}{4}\right)^2 \cdot D^2 \cdot v_{x\max} \quad (\text{Eq. 2.13})$$

Em conclusão, pode-se dizer que, em qualquer um dos casos anteriores, obtém-se o mesmo resultado: a vazão volumétrica é sempre igual ao produto da velocidade média multiplicada pela área de seção transversal do duto onde o fluido percorre,

$$Q_v = \bar{v}_{ax} \cdot A, \quad (\text{Eq. 2.14})$$

$$\text{onde } \bar{v}_{ax} = \frac{1}{A} \int_A v_x(y) \cdot dA \quad (\text{Eq. 2.15})$$

d) Perfil geral de velocidade: Para o caso geral, uma aproximação de um perfil de velocidade é dada por:

$$v_x(y) = v_{x\max} \cdot \left(1 - \left(\frac{y}{R}\right)\right)^{1/n} \quad (\text{Eq. 2.16})$$

onde, $R = D / 2$ e n é um coeficiente que depende do número de Reynolds.

$$\begin{aligned} n &= 3.299 + 0.3257 \cdot \ln(\text{Re}) && \text{para } \text{Re} < 4 \cdot 10^5 \\ n &= 5.5365 + 5.498 \cdot 10^{-6} \cdot (\ln(\text{Re}))^5 && \text{para } \text{Re} > 4 \cdot 10^5 \end{aligned} \quad (\text{Eq. 2.17})$$

Neste caso, o valor médio de amplitude do vetor de velocidade e a vazão volumétrica são dados por:

$$\bar{v}_{ax} = v_{x\max} \cdot \frac{n}{n+1} \quad (\text{Eq. 2.18})$$

$$Q_v = v_{x\max} \cdot \frac{n}{n+1} \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (\text{Eq. 2.19})$$

Mais informações consultar Pereira [1].

2.2. Conceitos de Acústica

O som é uma onda mecânica que se propaga em meios sólidos, líquidos ou gasosos; e as ondas ultrassônicas são ondas sonoras com frequência acima de 20 kHz [25], Figura 2.4. Embora a onda ultrassônica se comporte de forma similar ao som audível, estas têm um comprimento de onda (λ) menor. Isso significa que podem ser refletidas em pequenas superfícies, tais como defeitos em materiais sob teste em ensaios não destrutivos.

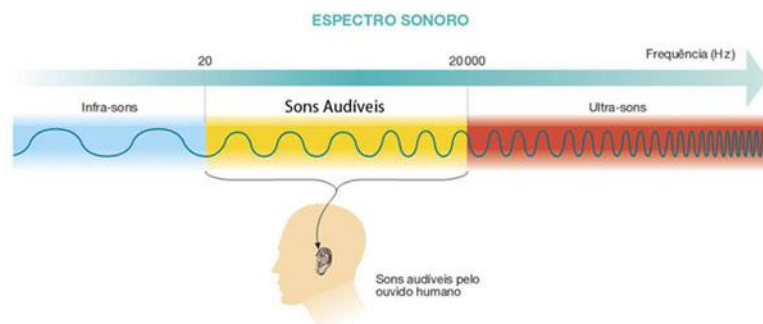


Figura 2.4. Espectro acústico de frequência [25]

2.2.1. Velocidade de propagação

A velocidade de propagação [25] da onda em um meio elástico sob uma determinada temperatura e pressão constante é determinada por:

$$c = \frac{\lambda}{T} = \lambda \cdot f \quad (\text{Eq. 2.20})$$

onde, c velocidade de propagação do som no meio de propagação [m/s]; λ comprimento de onda [m]; T período da onda [s]; e f é frequência da onda em propagação [1/s].

A velocidade do som é função da densidade do meio e varia com a pressão e temperatura. No ar, a 20 °C, é aproximadamente de 343 m/s e, na água, a 20 °C é de, aproximadamente, 1495 m/s. A equação geral para velocidade de propagação (c) de uma onda sonora, em meio gasoso, líquido ou sólido, para processo isentrópico é:

$$c = \sqrt{\left. \frac{\partial P}{\partial \rho} \right|_s} \quad (\text{Eq. 2.21})$$

onde, P é a pressão exercida pelo emissor de som [kg/m.s]; ρ é a massa específica [kg/m³]; e s é a entropia.

2.2.2. Tipos de propagações

Ondas longitudinais: uma onda de compressão em que as partículas se movem no mesmo sentido da propagação da onda, como a da Figura 2.5.

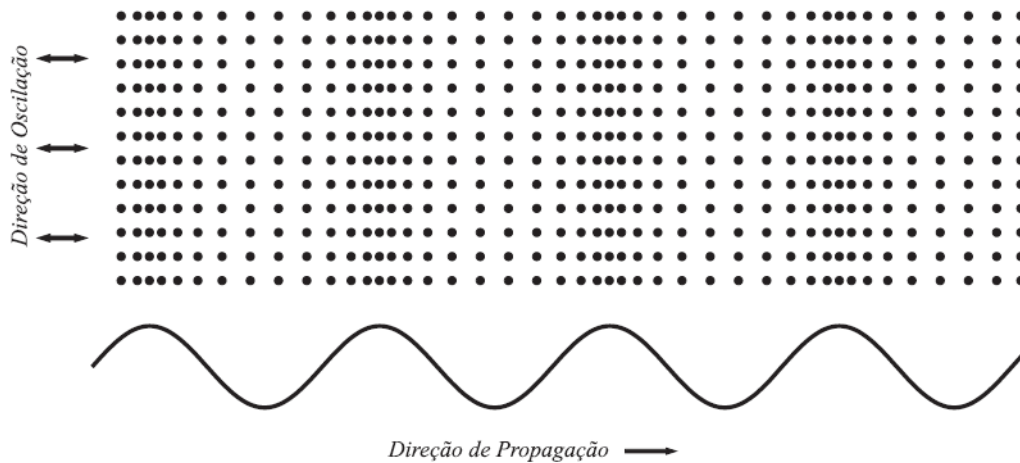


Figura 2.5. Ondas longitudinais

Ondas transversais: também conhecida como onda de cisalhamento, a direção de deslocamento das partículas é perpendicular à sua propagação, como mostra na Figura 2.6.

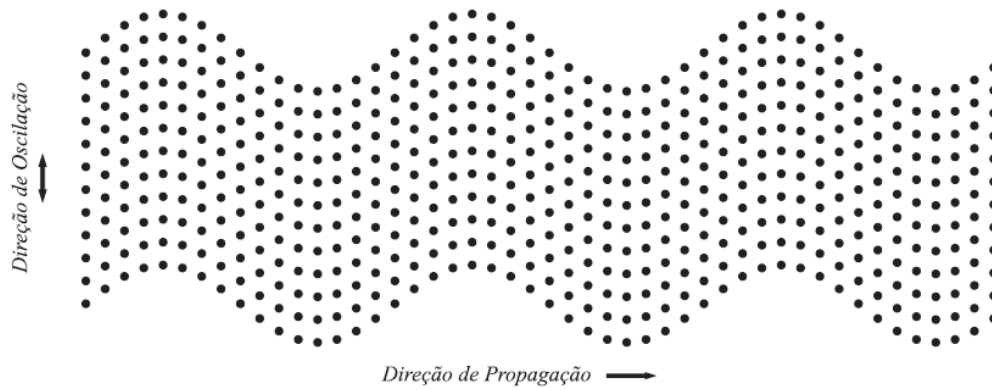


Figura 2.6. Ondas transversais

Ondas superficiais ou de Rayleigh: propaga-se na superfície limite (interface) entre um meio sólido e o ar, estando a profundidade de penetração limitada a um comprimento de onda, Figura 2.7.



Figura 2.7. Ondas Superficiais

Onda de Lamb: quando uma onda superficial é introduzida em um material que tenha espessura igual ou menor a três comprimentos de onda, é gerado um tipo vibracional complexo que se propaga paralelamente à superfície, conhecida como onda de chapas ou de Lamb.

2.2.3. Impedância acústica

É a resistência oferecida à propagação de uma onda ultrassônica em um meio de propagação [25]. Cada material tem diferentes impedâncias acústicas. A água possui $1,480 \times 10^3$ [kg/m².s], enquanto o ar possui 430×10^3 [kg/m².s]. A impedância acústica pode ser obtida por meio de cálculos:

$$Z = \rho \cdot c \quad (\text{Eq. 2.22})$$

onde, Z representa a impedância [kg/m².s]; ρ é densidade do material [kg/m³]; e c velocidade do som no meio [m/s].

2.2.4. Pressão acústica

Quando o som se propaga no meio, as partículas oscilam, produzindo zonas de compressão e zonas de rarefação no meio [25]. A amplitude desta alternância de compressões em um meio é denotada de pressão acústica:

$$P = Z.a \quad (\text{Eq. 2.23})$$

onde, P é a pressão acústica [kg/m.s]; Z é a impedância acústica [kg/m².s]; e a é a amplitude de vibração da partícula [m].

2.2.5. Intensidade sonora

Relaciona a impedância acústica e a amplitude de vibração das partículas do meio:

$$I = \frac{P^2}{2.Z} = \frac{P.a}{2} \quad (\text{Eq. 2.24})$$

onde, I é intensidade sonora; P é pressão acústica [kg/m.s]; Z é a impedância acústica [kg/m².s]; e a é a amplitude de vibração [m].

2.2.6. Atenuação do som

É a redução da intensidade acústica causada pela resistência do meio para a transmissão de energia acústica [26],

$$\alpha_T = \frac{\Delta V_g}{2.d} \quad (\text{Eq. 2.25})$$

onde, α_T é o coeficiente de atenuação [dB/mm]; ΔV_g é diferença de amplitude dos dois primeiros ecos [dB]; d distância percorrida pelo som.

As causas de atenuação envolvendo o meio de propagação são:

Dispersão de ondas: está relacionada à perda por divergência do feixe causada pelo meio de propagação. Deve-se ao fato de o meio onde as ondas se propagam não ser absolutamente homogêneo, dando origem ao ângulo de divergência do feixe.

Absorção das ondas ultrassônicas: as ondas sonoras, em alguns materiais, são absorvidas pelo processo de histerese mecânica, fricção interna ou outros mecanismos de perda de energia.

Perdas devido à rugosidade superficial: uma terceira causa de atenuação é a perda de transmissão do som devido à rugosidade da superfície.

Difração: perdas causadas pelo fenômeno de difração.

2.2.7. Ondas ultrassônicas

As ondas ultrassônicas produzidas por um transdutor piezoelétrico podem ser modeladas como uma onda senoidal amortecida [27]:

$$x(t) = At^n e^{-\alpha t} \cdot \sin(\omega t + \theta) \quad (\text{Eq. 2.26})$$

Neste modelo matemático, n , α , ω , θ são parâmetros dependentes do transdutor. A é a amplitude da onda, ω é a frequência angular de ressonância do transdutor piezoelétrico, t representa o tempo, n e α são constantes empíricas que são determinadas por experimento. A relação $At^n e^{-\alpha t}$ é conhecida como o envelope da onda ultrassônica. O sinal ultrassônico simulado é semelhante ao ilustrado na Figura 2.8.

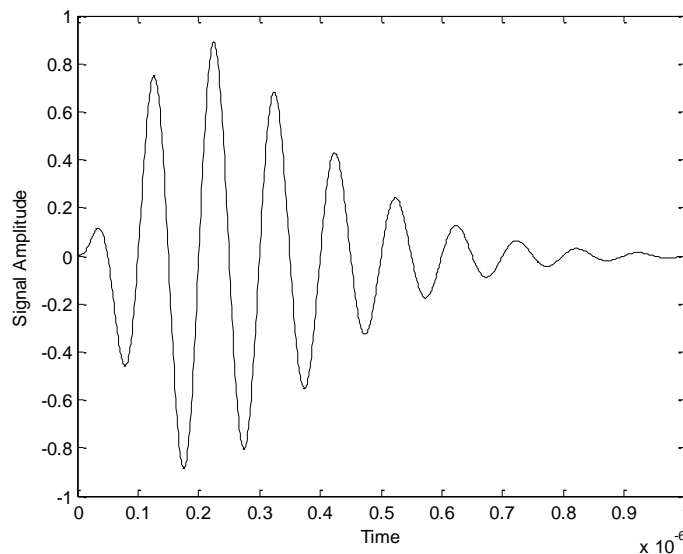


Figura 2.8. Sinal Ultrassônico teórico a partir de Eq. 2.26

Alguns transdutores ultrassônicos geram as ondas ultrassônicas com envelopes no formato da função Gaussiana [27, 46]. Utilizando o modelo com envelope gaussiano, a forma de onda seria conforme a Figura 2.9.

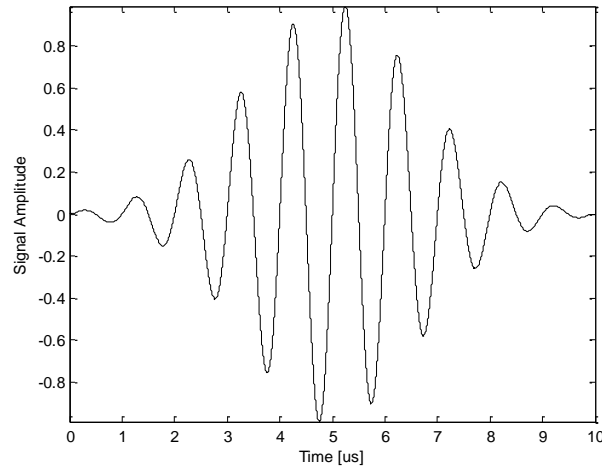


Figura 2.9. Sinal ultrassônico com Envelope Gaussiano

As Figuras 2.8 e 2.9 representam o sinal transmitido por um transdutor ultrassônico. Ao se propagar pelo meio, o sinal ultrassônico ($x(t)$) sofre influência da interação com ambiente no qual foi gerado. O transdutor receptor receberá uma onda ultrassônica atenuada e com ruído adicionado ao sinal original. Logo, o sinal ultrassônico pode ser modelado pela seguinte equação matemática:

$$y(t) = x(t - ToF) + n(t) \quad (Eq. 2.27)$$

$$y(t) = A.(t - ToF)^n e^{-\alpha.(t-ToF)}. \sin(\omega(t - ToF) + \theta)u(t - ToF) + n(t) \quad (Eq. 2.28)$$

Sendo, $y(t)$ o sinal recebido pelo transdutor receptor, ToF é o tempo de trânsito da onda ultrassônica entre transdutores transmissor e receptor, $u(t - ToF)$ representa a função degrau unitário atrasado pelo tempo de trânsito (ToF) e $n(t)$ ruído adicionado ao sinal (*non-correlated Additive White Gaussian Noise* - AWGN) [27,46].

2.2.8. Transdutores Ultrassônicos

Transdutores são componentes que convertem um tipo de energia em outra. Os transdutores ultrassônicos transformam a energia elétrica de excitação em energia mecânica na forma de som com frequências superiores a 20 kHz. Pela dualidade de muitos transdutores ultrassônicos, o mesmo componente transforma sinais acústicos ultrassônicos em sinais elétricos. Existem vários tipos de transdutores ultrassônicos, diferenciados pelo tipo de material base de construção e pelo seu mecanismo de funcionamento, destacando-se os piezoelétricos, os magnéticos, os capacitivos e os eletromagnéticos. O mais utilizado é o transdutor piezoelétrico, devido à ampla faixa de

frequência de operação e à possibilidade de operar em frequência de valores superiores a 10^6 hertz (MHz) [26].

Um material piezoelétrico é aquele que, quando aplicada uma força mecânica em seu corpo, o resultado é a geração de uma força eletromotriz em seus terminais. Pelo efeito piezoelétrico, aplicando-se uma força eletromotriz nos terminais do componente, o mesmo começa a vibrar, gerando energia mecânica acústica [25]. O efeito piezoelétrico é entendido como a interação eletromecânica linear entre a força mecânica e o estado elétrico em materiais específicos. Alguns exemplos de materiais piezoelétricos utilizados na fabricação de transdutores são cristais e cerâmicas. Estes transdutores piezoelétricos são os mais empregados no campo de medição de vazão, ensaios não destrutivos; na medicina, para aplicações com imagens de ultrassom; e outras áreas que envolvam sinais ultrassônicos [26].

2.2.8.1. Componentes estruturais do transdutor aplicados em medição de vazão

As propriedades acústicas do transdutor dependem fortemente da construção do transdutor. A Figura 2.10 ilustra o modelo de um possível transdutor ultrassônico.

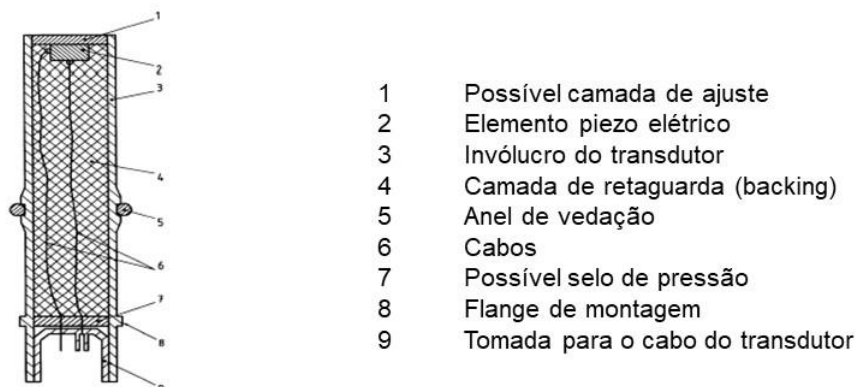


Figura 2.10. Modelo de configuração de um transdutor piezoelétrico

Os elementos que definem as características dos transdutores são os seguintes [16]: elemento piezoelétrico (ou elemento ativo); camada de retaguarda (ou *backing*); e camada de ajuste (ou *Wear plate*).

O elemento ativo converte energia elétrica em energia mecânica ultrassônica. Os materiais mais utilizados são os PZT's (Titanato Zirconato de Chumbo), que podem ser cortados em vários formatos e dimensões para produzir diferentes modos de ondas. Novos

materiais, como polímeros piezoelétricos e compósitos também estão sendo empregados para aplicações nas quais forneçam benefício para o transdutor e desempenho do sistema.

O *backing* é, geralmente, um material altamente atenuante e de alta densidade, usado para controlar a vibração do transdutor. É colocado atrás do elemento ativo e serve como um amortecedor mecânico do elemento ativo. Quando o elemento ativo começa a vibrar, o *backing* trabalha de forma a minimizar a quantidade de oscilações no tempo.

A camada de ajuste é usada para dar suporte mecânico ao transdutor, de modo a garantir máxima eficiência no acoplamento eletromecânico, e para impedir que haja reverberação, que consiste em um fenômeno de prolongamento de um som após o fim da emissão por parte de uma fonte emissora e é causada pela diferença entre a impedância acústica da cerâmica piezoelétrica e os meios que fazem contato com ela.

2.2.8.2. Características de um transdutor ultrassônico

Serão apresentadas as principais características dos transdutores [25 – 29].

Frequência de ressonância (f_{res}): A frequência natural do sistema eletromecânico correspondente ao valor máximo da potência elétrica de entrada Pe ou à máxima amplitude de deslocamento vibracional (ϵ). A frequência f_{res} depende da impedância elétrica de saída do gerador que alimenta o transdutor.

Largura de Banda (BW): é a porção da resposta em frequência que está dentro de um dado limite. A equação usada para BW é

$$BW = 100 \cdot \frac{f_u - f_l}{f_c} \quad (Eq. 2.29)$$

Frequência de corte em alta frequência (f_u) - onde a resposta em frequência cai para -6 dB na parte de alta frequência.

Frequência de corte de baixa frequência (f_l) - onde a resposta em frequência cai para -6 dB na parte de baixa frequência.

Frequência central (f_c) é dada pela metade entre os limites das frequências f_l e f_u .

Resposta em frequência: curva característica da resposta do transdutor quando o mesmo é submetido a um ensaio de pulso-eco (espectro de frequência). Mostra o comportamento do transdutor sob diferentes frequências de excitação.

Fator de Qualidade (Q_{ft}) é definido como a razão entre a frequência de ressonância (f_{res}) e a largura de banda ($BW = f_u - f_l$). Um transdutor de alto Q_{ft} produz um pulso em faixa de frequências muito próximas, isto é, largura de banda estreita, ao passo que um transdutor de Q_{ft} baixo produz altos espectros de frequências.

$$Q_{ft} = \frac{f_{res}}{f_u - f_l} \quad (Eq. 2.30)$$

Impedância Elétrica: Comportamento da impedância do transdutor referente à frequência.

$$Z = |Z| \cdot e^{-j\theta}, \quad (Eq. 2.31)$$

onde, Z é uma impedância complexa; $|Z|$ é o módulo da impedância elétrica do transdutor.

Sensibilidade pulso-eco: uma medição que compara a amplitude de tensão aplicada com a amplitude da tensão pulso-eco registrada por um alvo especificado.

Potência elétrica de entrada (P_e) é a potência elétrica consumida pelo transdutor quando este é excitado com um pulso elétrico.

Potência acústica de saída (P_a) é a potência do pulso ultrassônico quando emitido pelo transdutor ultrassônico.

Feixe ultrassônico é a forma de propagação do som emitido pelo transdutor. É dividido em duas zonas: o campo próximo e o campo distante, Figura 2.11. O campo próximo é a região diretamente à frente do transdutor, onde a amplitude de eco se propaga através de uma série de máximos e mínimos e finaliza no último máximo a uma distância N do transdutor. A localização do último máximo é conhecida como a distância de campo próximo e é o foco natural do transdutor. O campo distante é a área além de N onde a pressão do campo sonoro gradualmente cai para zero.

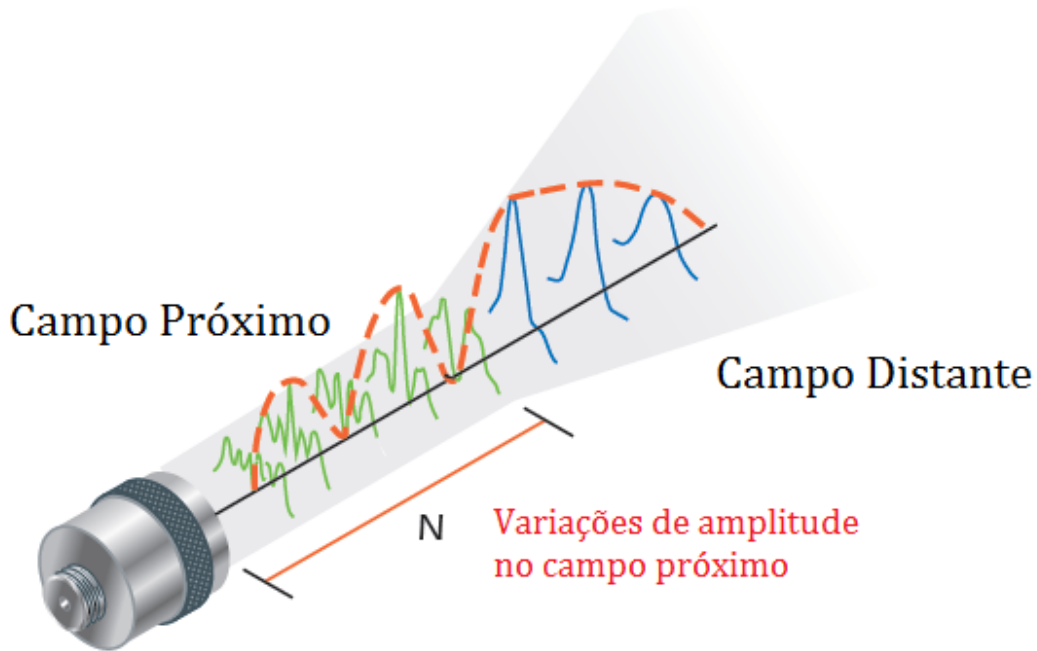


Figura 2.11. Campo Sonoro – Fonte: Olympus [30]

2.3. Cálculo de Vazão a partir dos Tempos de Trânsito

2.3.1. Posicionamento dos transdutores no conduto

A norma IEC 60041 de 1992 [17] descreve os métodos de medição de vazão aplicados a sistemas hidráulicos e dá um destaque especial ao medidor de vazão ultrassônico. Esta norma atualmente passa por um processo de revisão, colocando o método de medição ultrassônico por Tempo de Trânsito como um processo primário de estimativa de vazão. A norma IEC60041 aborda o conceito matemático para determinar a vazão a partir dos Tempos de trânsitos dos sinais ultrassônicos, cálculos de incertezas e processos mecânicos de posicionamento das trajetórias acústicas em condutos de grandes diâmetros. O foco da Norma está nos medidores de vazão ultrassônicos multi-trajetórias, pois seu conteúdo descreve diversos tipos de configurações de trajetórias. Porém, uma configuração que ganha destaque é a que envolve oito trajetórias acústicas divididas em dois planos cruzados, como destacado na Figura 2.12. Os ângulos de referência α_1 e α_2 são padronizados e possuem valores de 36° e 72° , respectivamente, para esta configuração.

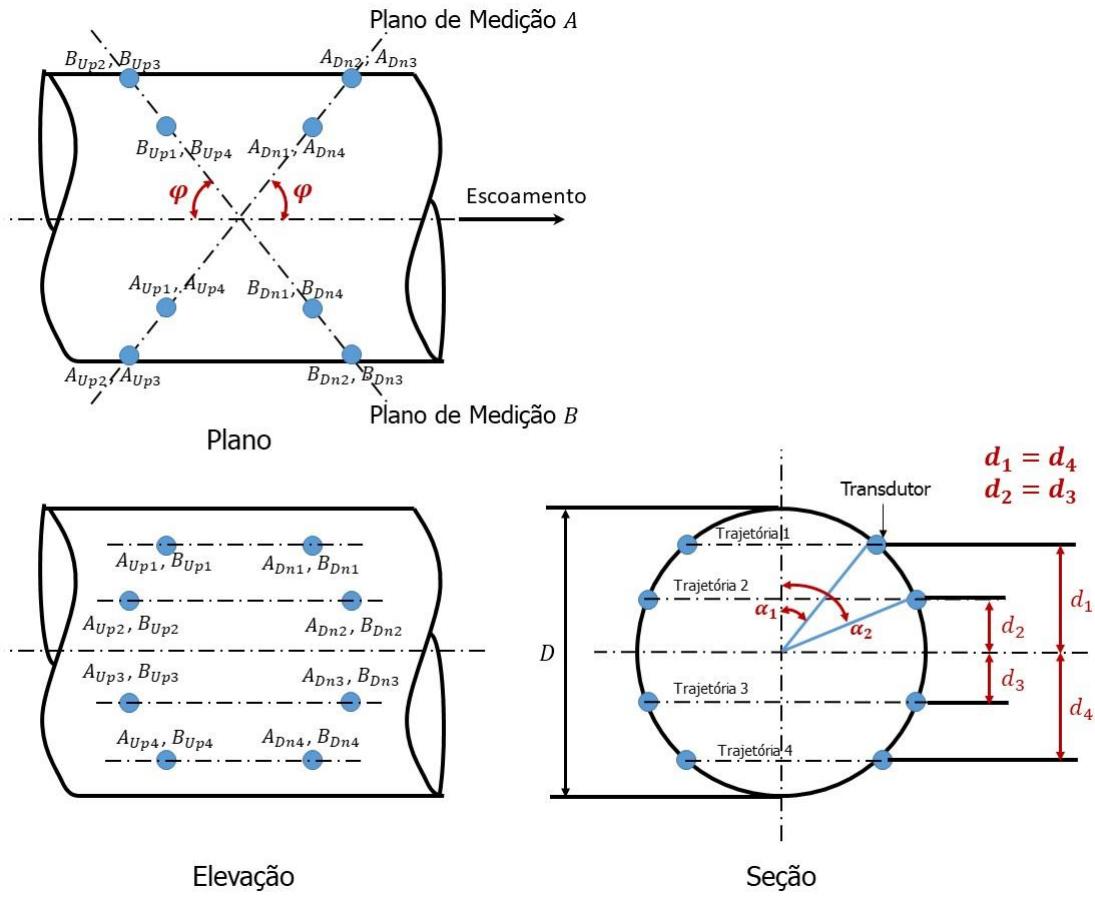


Figura 2.12. Configuração de posições dos transdutores em conduto [17]

2.3.2. Princípio de medição

Os medidores de vazão ultrassônicos a Tempo de Trânsito dispõem de transdutores com cristais piezoelétricos que enviam e recebem pulsos ultrassônicos de alta frequência, transversalmente à tubulação. A Figura 2.13 ilustra o arranjo de uma trajetória dos transdutores num conduto fechado para aferição de vazão por tempo de trânsito. O pulso que segue na direção do escoamento (pulso que segue em direção à face do Transdutor 2, *downstream* (jusante)) percorre a distância (L) em um intervalo de tempo (t_{down}) menor do que o pulso que segue na direção oposta (pulso que segue em direção à face do Transdutor 1, *upstream* (montante)) percorrendo em um tempo (t_{up}). A velocidade axial média do escoamento do fluido será proporcional à diferença entre os tempos de propagação contra e a favor do escoamento ($t_{up} - t_{down}$) [10].

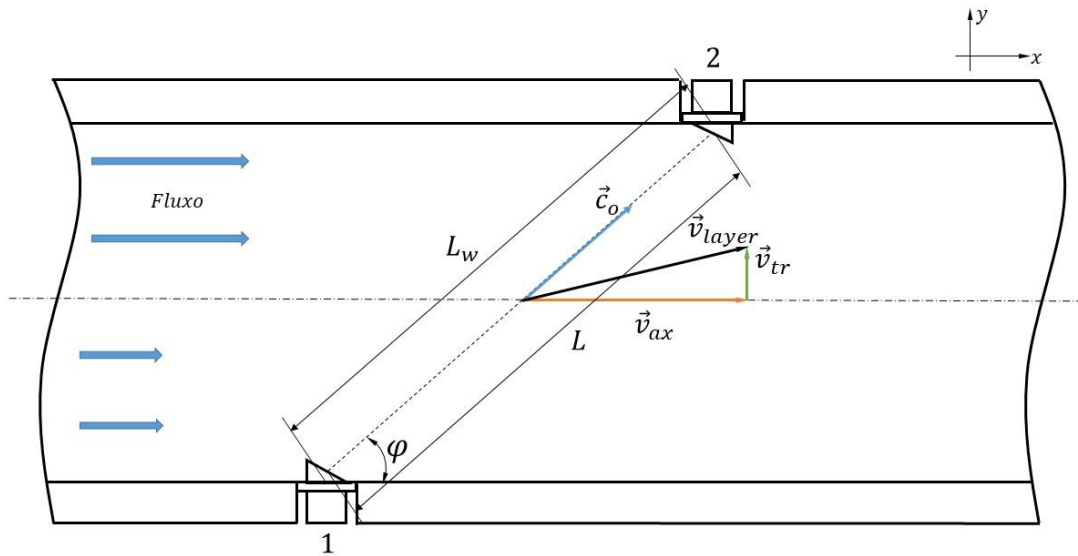


Figura 2.13. Princípio do Método de Tempo de Trânsito

Considerações relevantes ao princípio do método de medição por Tempo de Trânsito:

- L_w é o comprimento da trajetória medida em referência à parede;
- L é o comprimento da trajetória entre as faces dos transdutores;
- $L_T = L_w - L$ é o comprimento formado pela saliência do transdutor;
- φ é o ângulo formado pela trajetória acústica;
- \vec{v}_{ax} é o vetor velocidade axial;
- \vec{v}_{tr} é o vetor velocidade transversal;
- $\vec{v}_{layer} = \vec{v}_{ax} + \vec{v}_{tr}$ é a soma vetorial da velocidade;
- t_{down} é o tempo de propagação da onda a favor do fluxo (tempo de *downstream* ou tempo a jusante);
- t_{up} é tempo de propagação da onda contra o fluxo (tempo de *upstream* ou tempo a montante).

Para o escoamento completamente desenvolvido, o cálculo da velocidade axial média (\bar{v}_{ax}) do fluido na trajetória é desenvolvido a seguir.

A **velocidade de propagação das ondas ultrassônicas com a presença de escoamento** ($v_{down/up}$) é a soma da velocidade do som (c) com a componente da velocidade axial média projetada na trajetória L e dado por

$$v_{down/up} = c \pm \bar{v}_{ax} \cdot \cos\varphi . \quad (Eq. 2.32)$$

Os tempos de propagação das ondas ultrassônicas a favor (t_{down}) e contra (t_{up}) ao escoamento são dados por

$$t_{down} = \frac{L}{c + v_{ax} \cdot \cos\varphi}, \quad (Eq. 2.33)$$

$$t_{up} = \frac{L}{c - v_{ax} \cdot \cos\varphi}. \quad (Eq. 2.34)$$

Manipulando as equações Eq. 2.33 e 2.34 tem-se a velocidade axial média

$$\bar{v}_{ax} = \frac{L}{2 \cdot \cos\varphi} \cdot \frac{(t_{up} - t_{down})}{t_{up} \cdot t_{down}}. \quad (Eq. 2.35)$$

A velocidade do som (c) pode ser determinada em função dos tempos de trânsito

$$c = \frac{L}{2} \cdot \frac{t_{up} + t_{down}}{t_{up} \cdot t_{down}}. \quad (Eq. 2.36)$$

2.3.3. Cálculo de vazão para uma trajetória acústica

O cálculo de vazão volumétrica (Q_v) de um medidor de vazão com uma trajetória acústica [10], onde os transdutores formam uma trajetória acústica cortando o diâmetro da tubulação, é determinado pela seguinte equação:

$$Q_v = A \cdot \bar{v}_{ax}(D) \quad (Eq. 2.37)$$

onde, A é a área do conduto fechado; e $\bar{v}_{ax}(D)$ é a velocidade axial média no diâmetro do conduto.

Para determinar $\bar{v}_{ax}(D)$ através da área da seção transversal (A) e, conseqüentemente, a vazão volumétrica, um fator de correção de distribuição de velocidades K_k deve ser conhecido [11]. Logo,

$$K_k = \frac{1}{1.12 - 0.011 \cdot \log(R_e)} \quad (Eq. 2.38)$$

para um escoamento turbulento totalmente desenvolvido, e

$$K_k = 0.75$$

para escoamento laminar.

Reformulando Q_v , tem-se que:

$$Q_v = K_k \cdot A \cdot \bar{v}_{ax} \quad (\text{Eq. 2.39})$$

2.3.4. Cálculo de vazão para várias trajetórias acústicas

2.3.4.1. Função de fluxo de área [31]

O conceito do cálculo de vazão está ligado à definição de função de fluxo de área ($F(z_i)$). A função de fluxo de área na altura z_i é definida pelo produto entre a velocidade axial média ($\bar{v}_{ax,i}$) e o comprimento da projeção da trajetória acústica no plano y-z, definido como $b(z_i)$. Logo, por definição, a função de fluxo de área é dada pela equação:

$$F(z_i) = \bar{v}_{ax,i}(z_i) \cdot b(z_i) \quad (\text{Eq. 2.40})$$

Como mostrado na Figura 2.14-b, $b(z_i)$ é definido por:

$$b(z_i) = L_i \cdot \sin(\varphi) \quad (\text{Eq. 2.41})$$

Numericamente, a vazão Q_v pode ser aproximada pela soma das taxas de fluxo parciais ΔQ para cada faixa horizontal, como mostrado na Figura 2.14-a. Assim, somando diversas faixas é possível estimar a vazão e a expressão resultante é:

$$Q_v \approx \sum_{i=1}^N \Delta Q_i = \sum_{i=1}^N \bar{v}_{ax,i} \cdot A_i = \sum_{i=1}^N \bar{v}_{ax,i} \cdot b(z_i) \cdot \Delta z = \sum_{i=1}^N F(z_i) \cdot \Delta z \quad (\text{Eq. 2.42})$$

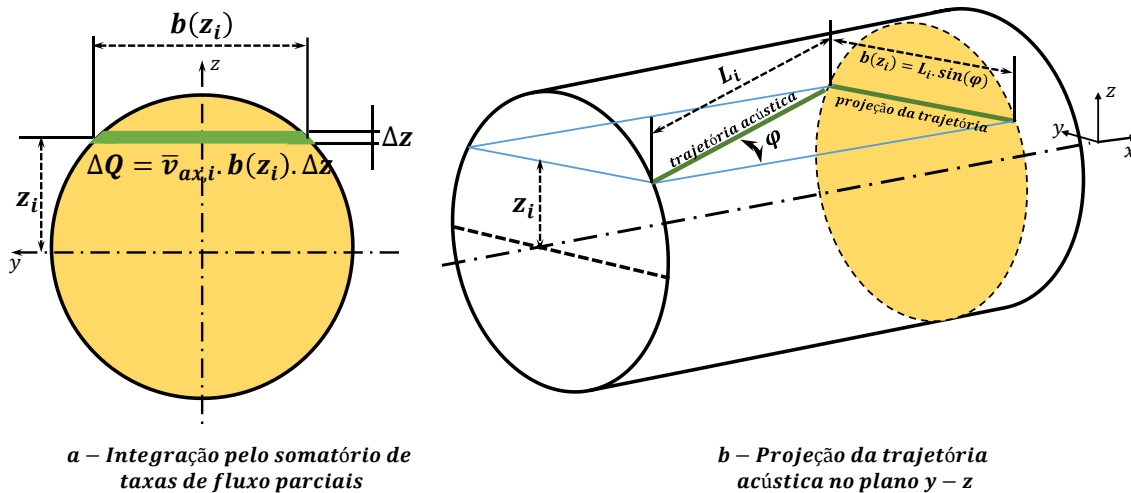


Figura 2.14. Processo de integração numérica para cálculo de vazão

Se este somatório tendesse ao infinito, resultaria na expressão dada pela Eq. 2.43.

$$Q_v = \int_{-D/2}^{D/2} F(z).dz = \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{i=0}^N \Delta Q_i \quad (Eq. 2.43)$$

Em um contexto teórico, a Eq. 2.43 é perfeita para se determinar a vazão Q_v . Porém, em casos práticos, para satisfazer a integral da equação, infinitas trajetórias acústicas deveriam ser colocadas no conduto para se medir a vazão. Na prática, apenas um número finito de trajetórias é usado para obter a medida de vazão. Este número está relacionado à quantidade de trajetórias utilizadas pelo medidor. Assim, a integral da Eq. 2.43 é substituída por um processo de integração numérica envolvendo somatório e coeficientes de ponderação. A tarefa do método de integração numérica é, primeiramente, reconstruir a função de fluxo de área através de um número finito de amostras de medições de velocidades e, segundo, integrar esta função reconstruída da forma mais precisa possível para obter um valor estimado de vazão com menor margem de erro possível. Por fim, a Eq. 2.44 representa o cálculo da vazão através de uma integração numérica.

$$Q_v = \int_{-D/2}^{D/2} F(z).dz \cong C \cdot \sum_{i=1}^N w_i \cdot F(z_i) \quad (Eq. 2.44)$$

onde, C é uma constante; w_i é o coeficiente de ponderação; $F(z_i)$ é a função de fluxo de área para trajetória N .

Manipulando a Eq. 2.44 para efetuar o cálculo de vazão resulta na Eq. 2.45:

$$Q_v = k \cdot \frac{D}{2} \cdot \sum_{i=1}^N w_i \cdot \bar{v}_{ax,i}(z_i) b(z_i) \quad (Eq. 2.45)$$

Sendo:

Para seções circulares: $b(z_i) = L_i \cdot \sin(\varphi_i)$

Para seções retangulares: $b(z_i) = B$

- L_i é a distância da trajetória acústica i ;
- φ_i ângulo do trajetória entre trajetórias acústicas;
- D é a dimensão do conduto paralelo para a intercessão de dois planos acústicos;
- B é a dimensão do conduto perpendicular para D no caso de seções retangulares;
- w_i são coeficientes de ponderação dependendo do número de trajetórias e da técnica de integração usada;

- $\bar{v}_{ax,i}(z_i)$ é a velocidade média axial ao longo da trajetória i ;
- N é o número total de caminhos acústicos em um plano de medida;
- k representa um coeficiente de correção calculado para cada técnica de integração numérica [17].

2.3.4.1. Métodos de integração

Os métodos de integração são fatores que influenciam nos erros de estimativa de vazão. A versão da norma IEC41 (1991) exemplifica dois métodos de integração: Gauss-Legendre (seções retangulares) e Gauss-Jacobi (seções Circulares). Contudo, novos métodos de integração vêm sendo estudados, destacando-se o chamado OWICS (*Optimal Weighted Integration for Circular Sections*) e OWIRS (*Optimal Weighted Integration for Rectangular Sections*), usados em seções circulares e retangulares, respectivamente [32]. O que diferencia os métodos descritos na norma e os novos citados são os perfis de velocidades [31]. Os primeiros propõem perfis de velocidades uniformes, conforme apresentado na Figura 2.15, enquanto os outros propõem perfis de velocidades totalmente desenvolvidos, como apresenta a Figura 2.15.


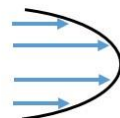
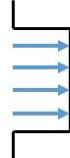
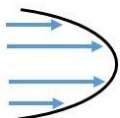




	Gauss-Jacobi	OWICS	Gauss-Legendre	OWIRS
Configurações				
Perfil de velocidade ideal simétrico	Infinito R_e , constante 	R_e alto, Ação da parede 	Infinito R_e , constante 	R_e alto, Ação da parede 
Seção transversal do duto	 $b(z) = 2\sqrt{R^2 - z^2}$	 $b(z) = 2\sqrt{R^2 - z^2}$	 $b(z) = B$	 $b(z) = B$
Parâmetro κ	0.5	0.6	0	0.15

Figura 2.15. Perfis de velocidades em condutos para os métodos de integração [31]

Como a distribuição de velocidade é em função do número de Reynolds (Re) e da rugosidade da parede do conduto, os perfis de velocidades tradicionais não levam em consideração a rugosidade da parede do conduto, enquanto os perfis de velocidade novos levam em consideração esta característica.

Os cálculos dos coeficientes de ponderação podem ser feitos através da expressão Eq. 2.46, onde o parâmetro κ é dependente do tipo de integração utilizado e seu valor está apresentado na Figura 2.15. A equação Eq. 2.47 descreve o polinômio da integração de Lagrange.

$$w_i = \frac{1}{\left(1 - 4 \cdot \frac{z_i^2}{D^2}\right)^\kappa} \cdot \frac{2}{D} \cdot \int_{-D/2}^{D/2} \left(1 - 4 \cdot \frac{z_i^2}{D^2}\right)^\kappa \cdot L_i \cdot dz \quad (Eq. 2.46)$$

$$L_i(z) = \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^N \frac{z - z_k}{z_i - z_k} \quad (Eq. 2.47)$$

$L_i, i = 1, \dots, N$ são polinômios da interpolação de Lagrange (L_i).

A Tabela 2.1 relata os coeficientes de ponderação para os perfis de trajetórias mais utilizados: dois planos e quatro trajetórias por plano; e dois planos e nove trajetórias por plano.

Tabela 2.1. Coeficientes de ponderação para 4 e 9 trajetórias no plano

Número de trajetórias N	Gauss-Jacobi posições & Gauss-Jacobi coeficientes		ângulo (α)	Gauss-Jacobi posições & OWICS coeficientes		Gauss-Legendre posições & Gauss-Legendre coeficientes		Gauss-Legendre posições & OWIRS coeficientes	
	Posições $z/(D/2)$	Coefficientes w_i		Posições $z/(D/2)$	Coefficientes w_i	Posições $z/(D/2)$	Coefficientes w_i	Posições $z/(D/2)$	Coefficientes w_i
4	± 0.809017	0.369316	36°	± 0.809017	0.365222	± 0.861136	0.347855	± 0.861136	0.336984
	± 0.309017	0.597566	72°	± 0.309017	0.598640	± 0.339981	0.652145	± 0.339981	0.655527
9	± 0.951057	0.097081	18°	± 0.951057	0.095849	± 0.968160	0.081274	± 0.968160	0.078403
	± 0.809017	0.184658	36°	± 0.809017	0.185362	± 0.836031	0.180648	± 0.836031	0.1827
	± 0.587785	0.25416	54°	± 0.587785	0.25367	± 0.613371	0.260611	± 0.613371	0.258953
	± 0.309017	0.298783	72°	± 0.309017	0.299176	± 0.324253	0.312347	± 0.324253	0.313833
	0	0.314159	90°	0	0.313796	0	0.330239	0	0.328802

Para mais informações consultar Apêndice I e a norma IEC 60041 [17].

Capítulo 3 – Eletrônica do Sistema de Medição de Vazão Ultrassônico

3.1. Introdução

O circuito eletrônico de um Medidor de Vazão Ultrassônico (MVU) multi-trajetórias por Tempo de Trânsito é uma eletrônica específica capaz de controlar a ação de vários transdutores piezoelétricos, calcular os tempos de trânsito das trajetórias acústicas e calcular a vazão com nível de incerteza baixo. É uma tecnologia que vem se desenvolvendo desde a década de 70 e, com o avanço da eletrônica nas últimas décadas, tornou-se um campo de desenvolvimento amplo em empresas especializadas em instrumentação metrológica.

Uma das primeiras empresas a desenvolver um MVU multi-trajetórias foi a *Westinghouse Electric Corp.* na década de 70. O diagrama de bloco do MVU desenvolvido pela *Westinghouse* é mostrado na Figura 3.1, consultado na Patente U. S. Patent 4109523 [33]. Nesta arquitetura, cada trajetória acústica inclui um respectivo canal de processamento de sinal, embora, na prática, a implementação deva ser feita por um circuito de propósito especial. Os pulsos acústicos nas quatro trajetórias são gerados e recebidos pelo circuito *Pulser/Receiver* (pulsador/receptor), bloco 24-1 (para a trajetória 1) ao 24-4 (para a trajetória 4). Estes circuitos incluem um bloco que mede os tempos de trânsito t_1 e Δt , tais que os valores de t_1 e Δt para cada trajetória são transferidos para respectivos circuitos eletrônicos, 28-1 ao 28-4, para prover o cálculo de $[\Delta t / (t_1 \cdot (t_1 + \Delta t))]$ de cada trajetória. Em acordo com a equação geral de cálculo de vazão [17], os valores calculados nos blocos 28-1 ao 28-4 são multiplicados pela constante $w_i \cdot L_i^2 \cdot \tan \varphi$ no bloco 30-1 a 30-4, provendo as respectivas taxas de vazão volumétrica por trajetória, representados na Figura 3.1 por q_1 , q_2 , q_3 e q_4 . Os valores calculados anteriormente são somados, uma média de várias medições é obtida sob um predeterminado período de tempo e após, multiplicada por uma constante X que consiste em dados do diâmetro do duto e constante de conversão de unidades. Estas operações são realizadas no circuito 32. Embora a taxa de vazão volumétrica obtida seja de alta precisão, uma mesma saída deve ser munida de uma multiplicação por certo fator de correção M_f , circuito 34, e a saída

é mostrada no display, bloco 36. O circuito apresentado na Figura 3.1 deixa claro que há um circuito dedicado de medição de tempo de trânsito para cada trajetória acústica, e que um próximo passo de processamento fica responsável por juntar a contribuição de cálculos individuais em um mesmo processamento para gerar os resultados finais de medição de vazão. Logo, cada circuito eletrônico dedicado a uma trajetória age de forma independente, assim, possivelmente, os *hardwares* individuais trabalham de forma paralela a obter os valores de tempo de trânsito.

U.S. Patent Aug. 29, 1978 Sheet 3 of 7 4,109,523

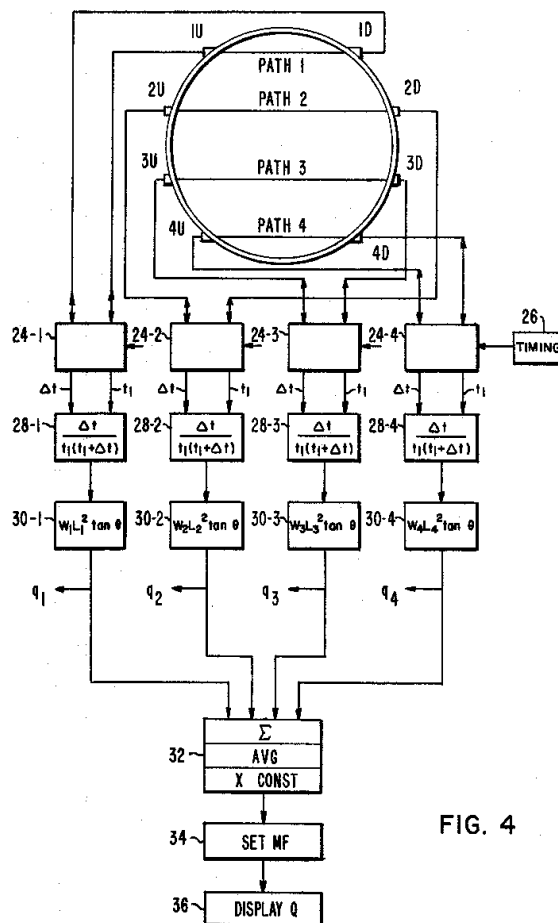


FIG. 4

Figura 3.1. Diagrama de Blocos do MVU Westinghouse [33]

Outra abordagem de circuito está ilustrada na Figura 3.2, referência tirada do site da *Texas Instruments* [34]. Trata-se de um diagrama de bloco de um sistema ultrassônico aplicado à área médica, no qual se utilizam vários transdutores ultrassônicos para fazer o mapeamento corporal para diagnósticos médicos, seja para exames pré-natais ou outros exames. Estes tipos de sistemas ultrassônicos utilizam dezenas ou centenas de transdutores piezoelétricos que necessitam de um sistema de emissão e recepção dos sinais ultrassônicos (*Transmitter/Receiver*) para cada transdutor. Porém, uma eletrônica dedicada para cada transdutor tornaria um sistema complexo e caro. A alternativa para este problema é o uso de um sistema multiplexado [35]. Um multiplexador consiste em um circuito eletrônico dedicado a selecionar um transdutor piezoelétrico de cada vez, excitar e receber os sinais do mesmo e transferir os sinais ultrassônicos recebidos para o bloco receptor dos sistemas ultrassônicos. Um detalhe importante a se destacar nestes tipos de sistemas multiplexados é o fato da redução de *hardware* dedicado ao processamento de sinal e, por consequência, a redução de custo do equipamento eletrônico. Estes tipos de eletrônica também são muito aplicados na área de ensaios não destrutivos como discutido em *Olympus* [35,36].

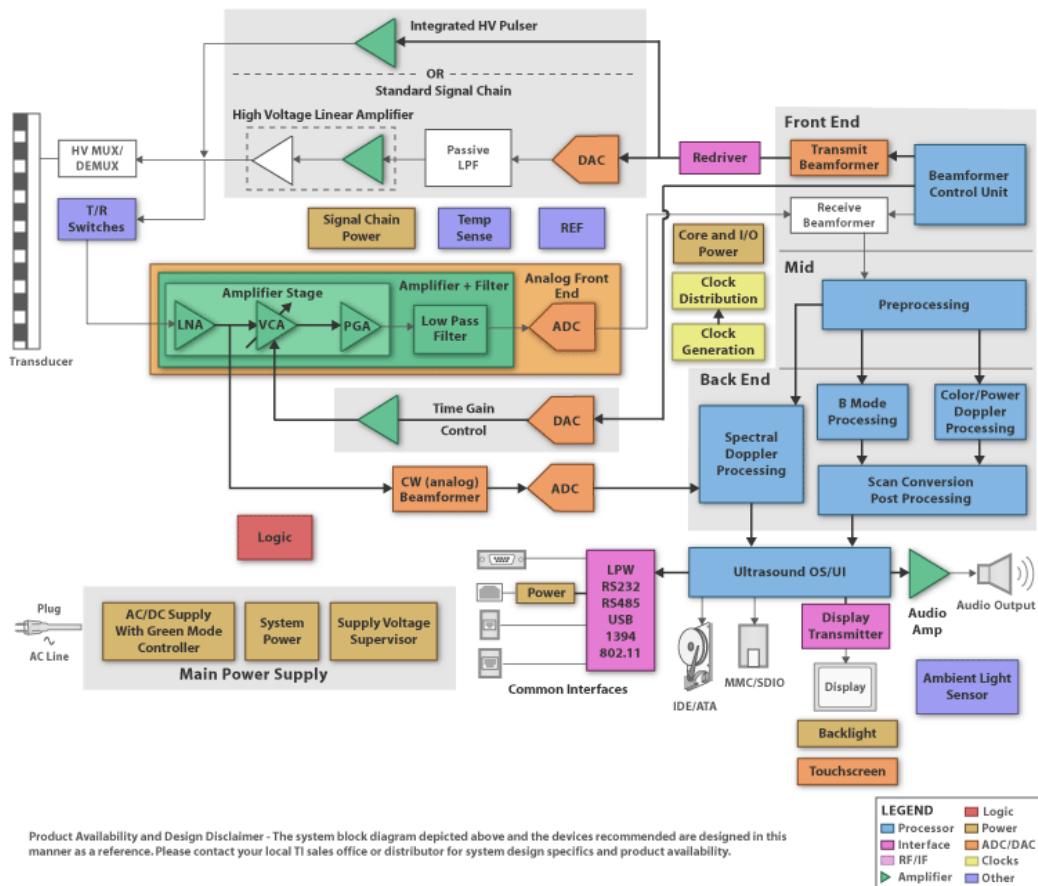


Figura 3.2. Diagrama de bloco de um sistema de ultrassom da Texas Instruments [34]

Analisando ambas as arquiteturas de *hardware*, Figuras 3.1 e 3.2, há entre elas uma similaridade de circuitos dedicados conhecidos como *Pulser/Receivers*. Um pulsador/receptor ultrassônico (*Ultrasonic Pulser/Receiver*) é um *hardware* específico para gerar pulsos elétricos de excitação e receber sinais ultrassônicos de um transdutor ultrassônico. O *hardware* é dividido em duas partes: a primeira é o pulsador e a segunda o receptor. A parte do pulsador é responsável por excitar o transdutor com um pulso elétrico para que o mesmo converta este sinal em uma onda ultrassônica. A segunda parte, o receptor, está associada ao tratamento do sinal elétrico vindo do transdutor quando o mesmo converte uma onda ultrassônica em sinal elétrico. Um circuito genérico pulsador/receptor é mostrado na Figura 3.3.

O que diferencia cada sistema ultrassônico são alguns fatores como: se o sistema é dedicado ou multiplexado; o tipo de transdutor utilizado no sistema; e o processamento digital de sinal que o sistema realiza. Os dois circuitos, Figuras 3.1 e 3.2, mostram esta diferença. O primeiro possui um sistema pulsador/receptor dedicado para cada trajetória acústica e o processamento de dados (e sinais) especializado na medição de tempo de trânsito e, conseqüentemente, o cálculo da vazão; o segundo mostra um sistema multiplexado e o processamento de dados (e sinais) voltado para transformar ondas ultrassônicas em imagens.

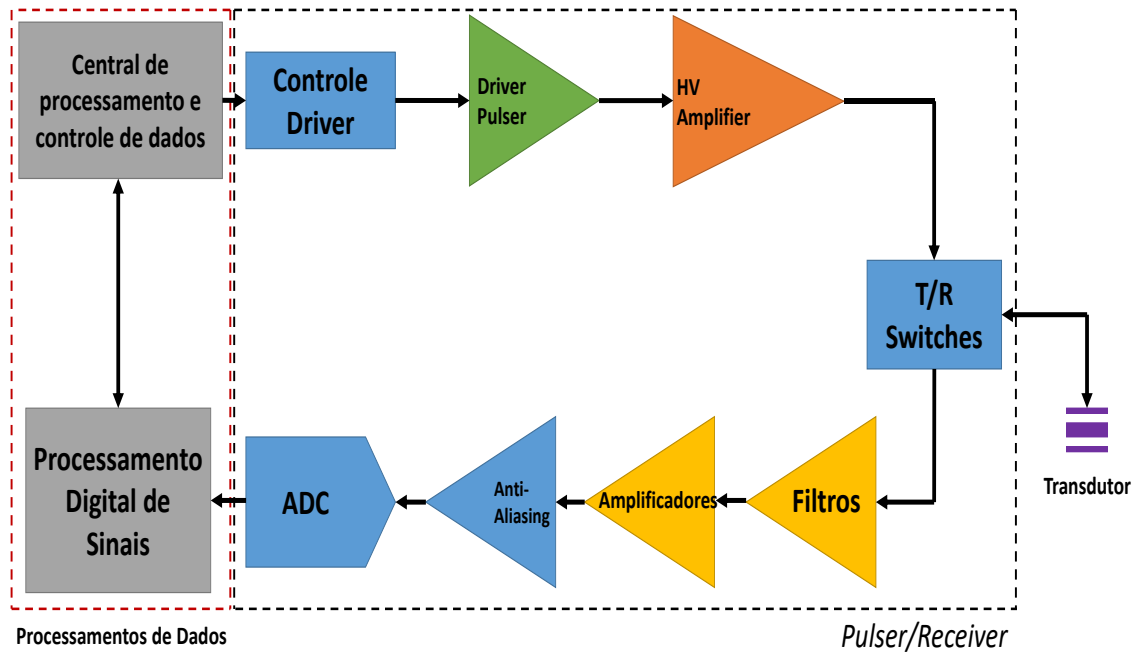


Figura 3.3. Diagrama de bloco pulsador/receptor

Este capítulo trata de descrever o circuito desenvolvido durante o projeto, apresentando o protótipo desenvolvido e a descrição do diagrama de bloco do circuito do MVU.

3.2. Proposta do protótipo do projeto

A Figura 3.4 apresenta o diagrama definitivo do *hardware* do Medidor de Vazão Ultrassônico. Esta topologia permite o controle de até 16 transdutores ultrassônicos que trabalham em frequências iguais ou superiores a 500 kHz. O circuito possui dois canais de aquisição de sinais denominados Canal A e Canal B. Cada canal é responsável por controlar e adquirir sinais de oito transdutores. O Canal A é responsável por controlar os transdutores *down* e o Canal B é responsável por controlar os transdutores *up*. Quando a trajetória é multiplexada, o Controle de Periféricos envia comando para o multiplexador, selecionando os transdutores formadores da trajetória em questão e fecham as chaves analógicas dos respectivos transdutores *down* e *up* pertencentes à trajetória. Também, o bloco *Pulser* possui dois circuitos *MOSFET's* de excitação de transdutores para cada Canal. O bloco Controle de Periféricos é responsável pelo controle dos *hardwares* como mostrado na Figura 3.4 e nas ações de cada canal. As seções a seguir descrevem cada bloco formador do *hardware* do MVU.

3.2.1. Descrição do bloco Transdutor

Pode-se dizer que o transdutor ultrassônico é o principal componente do medidor ultrassônico, uma vez que a onda ultrassônica enviada e recebida determina diretamente o desempenho da medida de vazão e toda arquitetura de *hardware* do sistema de medição. Para selecionar um transdutor ultrassônico, vários parâmetros devem ser levados em consideração, tais como a frequência de ressonância, largura de banda, faixa de detecção, entre outros. A frequência de ressonância influencia na atenuação do sinal e na Relação Sinal-Ruído (ou SNR, do inglês *Signal-to-Noise Ratio*).

3.2.1.1. Excitação de transdutores ultrassônicos

Os transdutores ultrassônicos são comumente excitados por pulsos elétricos de curta duração de tempo, dos quais a largura de banda temporal dos transdutores determina a forma do sinal. A largura do pulso é casada com a frequência do transdutor ultrassônico de tal forma que o fator limitante da banda no sinal ultrassônico emitido é a própria característica do transdutor em resposta à excitação [37].

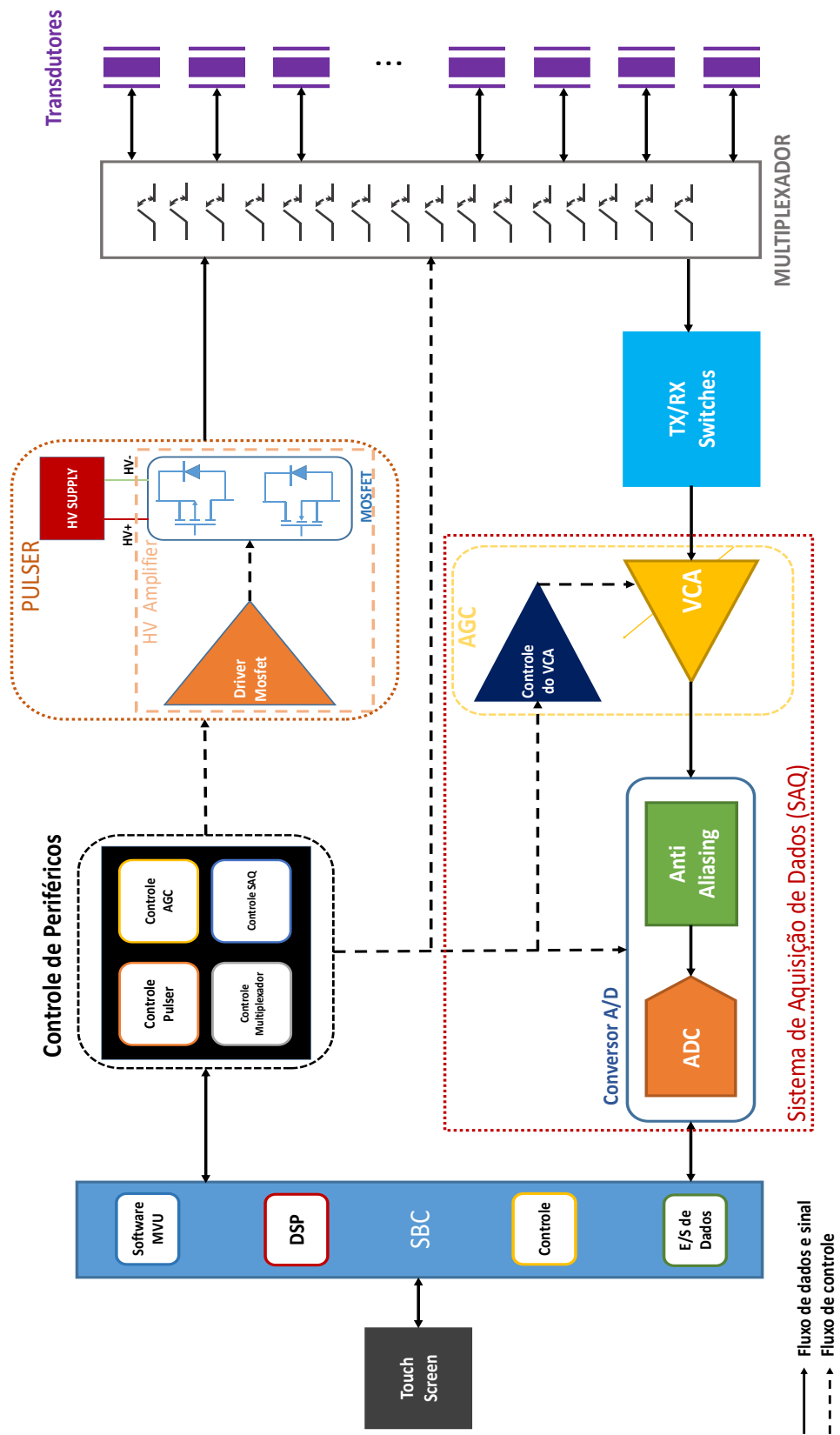


Figura 3.4. Diagrama de bloco do Medidor de Vazão Ultrassônico (MVU)

As formas mais comuns de pulsos de excitação são sinais quadrados e *Spike* (picos de tensão) [36], conforme a Figura 3.5, porém outros sinais podem ser aplicados para excitação de transdutores. Um sinal bastante aplicado para caracterização de transdutores é o sinusoidal *burst*, normas técnicas como ATMS E 1065 descrevem o uso deste tipo de sinais [28]. A polaridade do pulso é o fator que o caracteriza podendo ser unipolar, negativo ou positivo, e bipolar. Outros tipos pulsos são propostos em Person [37] e Xiao et al. [38].

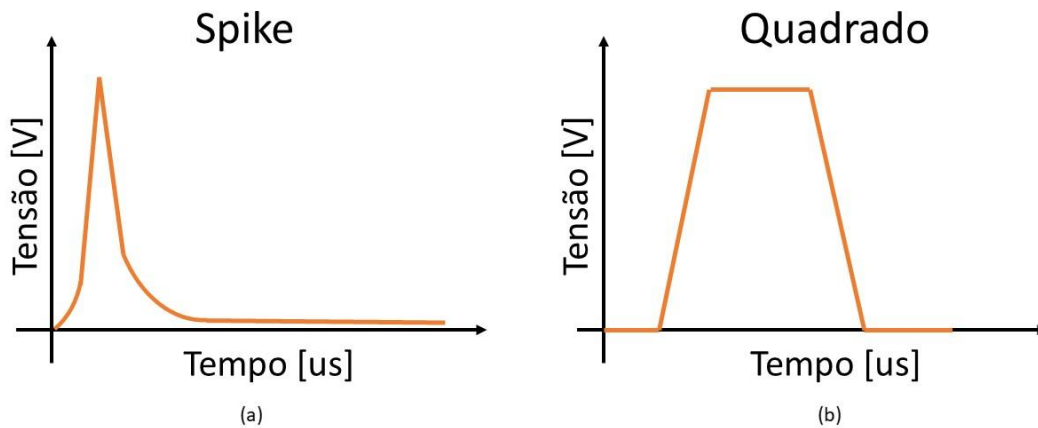


Figura 3.5. (a)Excitação Spike e (b) Excitação Quadrada

3.2.1.2. Características do Transdutor para aplicação em sistema de medição de vazão ultrassônico a Tempo de Trânsito

Numa aplicação envolvendo transdutores piezoelétricos, suas características influenciam na geração e recepção das ondas ultrassônicas. Observando o medidor de vazão que propõe este projeto, suas principais medições serão realizadas em condutos fechados com diâmetros superiores a 0,5 m e o fluido a ser medido é a água.

Outra característica importante, a saber, é o diagrama de irradiação de um transdutor, pois indica a capacidade de concentrar energia numa região do espaço. No caso envolvendo medidores de tempo de trânsito, o cone de propagação formado pelo lóbulo principal deve ser mais agudo, pois quanto mais agudo for o ângulo do cone, mais estreito será o feixe, maior será a densidade de potência na direção de irradiação, maior será a diretividade do transmissor e melhor será a SNR. A Figura 3.6 ilustra um exemplo de feixe de propagação para medidores de Tempo de Trânsito. Outra característica importante é a faixa de frequência que o transdutor pode operar. Tipicamente, sistemas a

Tempo de Trânsito trabalham em faixas de frequências entre 100 kHz e 2 MHz. Logo, transdutores ultrassônicos para esse tipo de aplicação devem possuir a frequência de ressonância (frequência central) dentro dessa faixa.

O ângulo entre as trajetórias acústicas possui grande relação nos cálculos de vazão. Há uma dependência no ângulo entre a trajetória e a direção do fluxo, erros sistemáticos podem ser inseridos no sistema devido ao ângulo da trajetória. Segundo a norma ISO 6412 [39], para minimizar a incerteza que é inserida no sistema, o ângulo entre as trajetórias acústicas e o fluxo do fluido deve estar entre 30° e 70°.

O encapsulamento do transdutor ultrassônico tem que ser feito de um material de alta resistência mecânica e que possa ser usado na água. Materiais como aço inoxidável 316SS são frequentemente usados para esse tipo de encapsulamento, pois possuem grande resistência mecânica e resistência à corrosão por água.

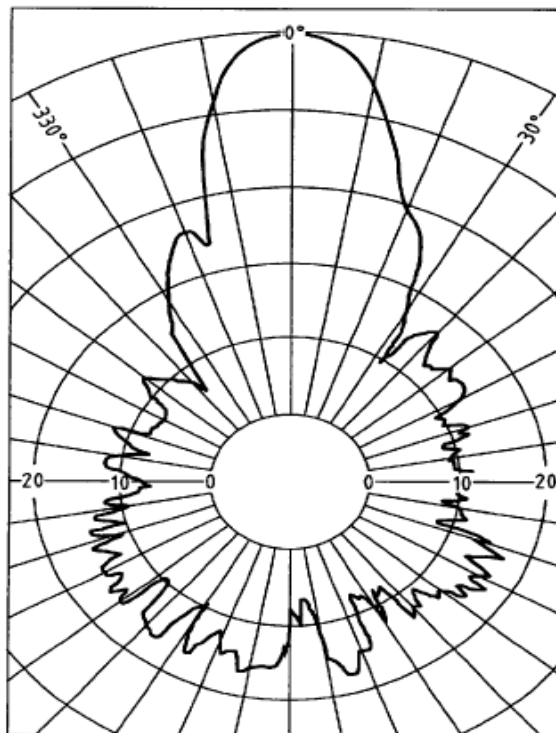


Figura 3.6. Padrão do feixe medido de um transdutor com diâmetro de saída de 2 cm em uma frequência de operação de 162 kHz [16]

3.2.1.3. Transdutores utilizados

Os transdutores utilizados foram os transdutores 8005 e 8010 da Cameron [15], de frequências centrais de 500 kHz e 1 MHz, respectivamente. Os transdutores 8005 são projetados para instalação em tubulações enterradas e/ou túneis com diâmetros na faixa

de 2,5 m (8 ft.) a 10,8 m (35 ft.). Os transdutores 8010 são projetados para instalações em tubulações enterradas e/ou túneis, com diâmetros na faixa de 1,5 m (5 ft.) a 7,7 m (25 ft.).

3.2.2. Descrição do bloco Multiplexador

Um sistema multiplexado é muito utilizado na área ultrassônica para aplicações industriais em que os medidores utilizam grande quantidade de transdutores. Tais aplicações com multiplexação reduzem a eletrônica do sistema e, assim, diminuem os custos associados ao *hardware*.

A eletrônica do medidor de vazão é capaz de multiplexar 16 transdutores ultrassônicos, utilizando, para isso, chaves analógicas baseadas em transistores *MOSFET's*. O multiplexador possui a capacidade de conduzir sinais de pico a pico de até 210 V podendo ser sinais bipolares ou unipolares. Possui uma largura de banda de 30 MHz e trabalha em frequências superiores a 300 kHz. O controle do multiplexador é realizado através de uma comunicação serial SPI (do inglês, *Serial Peripheral Interface*) com tensão digital de até 5 V.

3.2.3. T/R Switches

Um circuito *T/R Switch* tem duas funcionalidades no sistema e possui diferentes tipos de topologia [40]. A primeira função é proteger o circuito de condicionamento de sinais dos pulsos de alta tensão responsáveis pela excitação dos transdutores. A segunda função é permitir a passagem do sinal ultrassônico recebido pelo transdutor para o sistema de aquisição de sinais. Isto é necessário, pois o mesmo transdutor recebe e transmite sinais ultrassônicos e os pulsos de excitação dos transdutores podem danificar a eletrônica do sistema de aquisição de sinais. Utiliza-se um circuito *T/R Switch* contendo diodos *Schottky* responsáveis pelo chaveamento rápido e capazes de suportar picos de tensão de até 100 V.

3.2.4. Pulser

3.2.4.1. Conceito

É um bloco necessário para prover energia suficiente para o transdutor ultrassônico. Um sinal ultrassônico com maior potência significa que há menos perda de sinal ultrassônico ao se propagar no meio. Os amplificadores de tensão são constituídos por circuitos com *MOSFET's*. Há diversas topologias envolvendo *MOSFET* para aplicação

em circuitos de excitação de transdutores [38]. Uma topologia comum e simples envolve um elemento *MOSFET* ativo, Figura 3.7-a. Esta topologia é a mais convencional e, dependendo do tipo de *MOSFET*, P ou N, gera pulsos negativos ou positivos com tensões superiores a 100 V. Além disso, é tipicamente aplicada em pulsos do tipo *Spike* ou Quadrado.

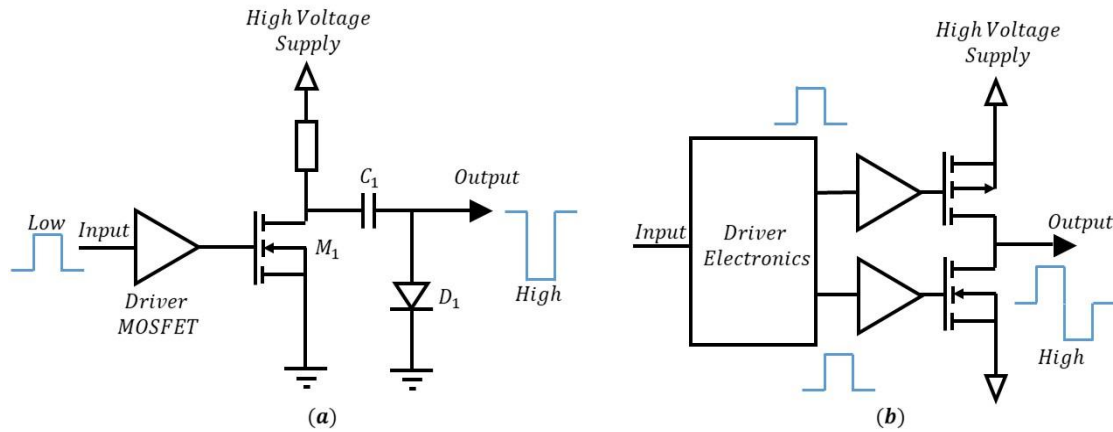


Figura 3.7. Amplificadores a *MOSFET*: a) Topologia convencional e b) Topologia *Half Bridge Output* [41]

Outra topologia usada é configuração em meia ponte (*half bridge output*) [41], Figura 3.7-b. Esta configuração é bem difundida em aplicações na área médica. Já existem pontes encapsuladas em um único CI (Circuito Integrado). Outra topologia encontrada é a *transformer push-pull* [41], apresentada na Figura 3.8. Consiste no uso de um transformador para alimentar o transdutor. Outro requisito das topologias são os *drivers* eletrônicos que controlam os *MOSFET*'s. Um bloco associado ao *Pulser* é a fonte de alimentação de alta tensão.

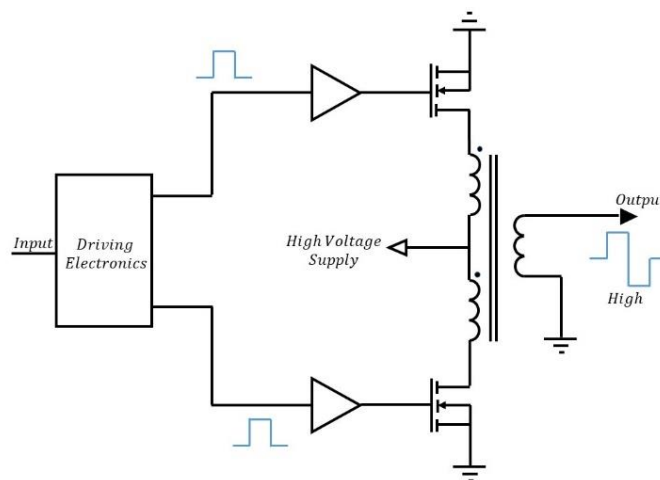


Figura 3.8. Topologia *transformer push-pull*

3.2.4.2. Modelo utilizado

Como mostrado na Figura 3.4, o bloco compreende três elementos principais: Driver *MOSFET*; *HV Amplifier* (ou amplificador de Alta tensão) e *HV Supply*. O Driver *MOSFET* é um elemento eletrônico capaz de controlar os transistores *MOSFET*'s utilizados no *HV Amplifier*. Os drivers controlam toda a formação dos pulsos de excitação. Por sua vez, os *HV Amplifier* são elementos capazes de chavear altas tensões em um curto período de tempo, na faixa de nanossegundos. São constituídos de transistores *MOSFET*'s de alta potência. Por último, destaca-se o bloco *HV Supply* que é a fonte de alta tensão contínua que alimenta o *HV Amplifier*.

A topologia utilizada no *hardware* desenvolvido baseia-se na configuração *half-bridge* da Figura 3.7-b, permitindo gerar pulsos quadrados unipolares e bipolares. A tensão de saída do *Pulser* é de 200 V pico a pico com chaveamento na faixa de nanossegundos. Seu controle é realizado com sinais digitais tendo como entradas os pinos *EN*, responsável por habilitar o funcionamento do *Pulser*; *INP*, entrada responsável por chavear a parte positiva do sinal de saída; *INN*, entrada responsável por chavear a parte negativa do sinal de saída; e *CLP*, entrada responsável pelo rápido retorno a zero do sinal de saída.

3.2.5. Controlador de Periféricos

Esse bloco é responsável por controlar todos os periféricos do *hardware* do sistema eletrônico. Muitas destas estruturas de controle baseiam-se em FPGA's [42], enquanto outras utilizam microcontroladores [43].

O projeto utiliza um SoC (do inglês, *System on Chip*) com processador da família AM335X com arquitetura ARM@[44]. As principais ações do Controlador de Periféricos no *hardware* são: controle do AGC; controle do *Pulser*; controle do Sistema de Aquisição de Dados (SAQ) e comunicação com a Central de Processamento (SBC, do inglês *Single Board Computer*). O controle do bloco *Pulser* possui um *driver MOSFET* contendo sete entradas digitais. O controle do bloco Multiplexador é feito segundo o protocolo SPI (do inglês, *Serial Peripheral Interface*) e o controle do AGC utiliza saídas PWM (do inglês, *Pulse Width Modulation*). O controle do SAQ é feito através de um sinal de *Trigger* que aciona o início de captura de dados ultrassônicos do ADC.

O microcontrolador da família AM335X possui um recurso indispensável para o controle de periféricos com precisão de tempo chamado de PRU-ICSS (do inglês, *Programmable Real-Time Unit Subsystem & Industrial Communication Subsystem*) [44]. As PRU's (*Programmable Real-Time Unit*) são processadores de alta velocidade de processamento (200 MHz, 32 bits) com acesso às entradas e saídas de um considerável número de GPIO's (do inglês, *General Purpose Input/Output*) e um total acesso interno às memórias e periféricos do processador AM335X.

3.2.6. Sistema de Aquisição de Dados

Este bloco é responsável por fazer o tratamento do sinal recebido pelos transdutores. Pode ser dividido em três importantes partes: filtros analógicos, amplificadores de sinais e conversores analógicos digitais (ou ADC, do inglês *Analog-to-Digital Converter*). Os filtros analógicos são aplicados para minimizar o efeito de ruído no sinal recebido pelos transdutores, sendo comum o uso de filtros ativos passa baixa ou passa faixa. O bloco seguinte é o *anti-aliasing* que são filtros passa baixas analógicos e o último bloco é o conversor analógico-digital. O ADC utilizado possibilita amostrar sinais com frequências de amostragem de até 500 MHz e 8 bits de resolução. O ADC já possui um protocolo de comunicação USB 3.0 que recebe dados de configuração e envia dados amostrados dos sinais ultrassônicos para a central de processamento digital de sinais. Também possui um *Buffer de Memória* capaz de armazenar um conjunto de amostras.

Os AGC's (do inglês *Automatic Gain Control*, ou controle de ganho automático) são empregados em [45] para amplificação de sinais ultrassônicos, pois são capazes de estabilizar de forma automática a amplitude do sinal recebido em um nível de amplitude predeterminado. O AGC desenvolvido neste projeto tem a capacidade de variar de -80 a 80 [dB] por canal. É constituído por dois blocos principais: O VCA (*Voltage Controlled Amplifier*) e o controle do VCA que é realizado por sinais PWM (*Pulse Width Modulation*).

3.2.7. Single Board Computer (SBC)

O bloco *Single Board Computer* (SBC) é responsável por várias ações do sistema, sendo o “cérebro” do *hardware*. A primeira função do SBC é o controle geral de toda a eletrônica do Medidor de Vazão. Esta função tem duas ramificações, a primeira é

comunicar com o bloco controle de periféricos, e fornecer ao mesmo os dados de configurações de cada periférico do sistema; e a segunda é configurar o Sistema de Aquisição de Dados. Outra função do SBC é o Processamento Digital dos Sinais (DSP) convertidos pelo SAQ; e realizar os cálculos de Tempo de Trânsito e vazão. Determina também o funcionamento do *software* do MVU e as Entradas/Saídas de Dados.

3.2.8. Touch Screen

O bloco *Touch Screen* é a principal interface homem-máquina do sistema. A tela de toque possibilita executar as ações no medidor de vazão, observar os resultados das medições e executar entradas e saídas do sistema. O uso da tela de toque foi proposto por ser um meio mais interativo entre o operador e o equipamento.

3.2.9. Diagrama de temporização do software embarcado desenvolvido para o sistema de Controle de Periféricos

A Figura 3.9 tem como objetivo mostrar a ação dos periféricos durante o funcionamento do MVU. Todas as ações mostradas no diagrama são realizadas pelos controles das PRU's. Observando o diagrama e iniciando sua análise pelo tempo -2 ms, nota-se que todos os periféricos estão inativos. Os primeiros periféricos a serem habilitados para o funcionamento são o Multiplexador e o ADC. O Multiplexador, após sua habilitação, faz o chaveamento da trajetória selecionada, enquanto o bloco ADC fica ocioso esperando um sinal de *trigger* para ser ativado. O próximo bloco a ser ativado é o *Pulser* onde ocorre a preparação para enviar o pulso A (excitação do transdutor *up* da trajetória selecionada). Um pouco antes do pulso ser enviado o bloco AGC é habilitado. No tempo 0 [ms], todos os periféricos estão funcionando, o ADC recebe o sinal de *Trigger* para começar a aquisição de dados, o multiplexador está com a trajetória selecionada e o bloco *Pulser* envia o pulso A de excitação do transdutor *up* ao mesmo tempo em que o AGC começa a atenuar ou amplificar o sinal adquirido pelo ADC. Após 4 ms, o *Pulser* envia o pulso B que excita o transdutor *down*. Ao decorrer de 8 ms do processo, todos os periféricos são desabilitados. Todo este processo demorou 10 ms. O processo se reinicia habilitando o multiplexador e o ADC, logo após, o multiplexador seleciona a próxima trajetória e o processo de aquisição de dados reinicia conforme descrito acima. Este processo é feito para todas as trajetórias e, ao término de todas as trajetórias, o ciclo se inicia novamente com a trajetória 1.

Os valores de tempo mostrados na Figura 3.9 podem ser modificados se as configurações do programa das PRU's forem configuradas com outros valores.

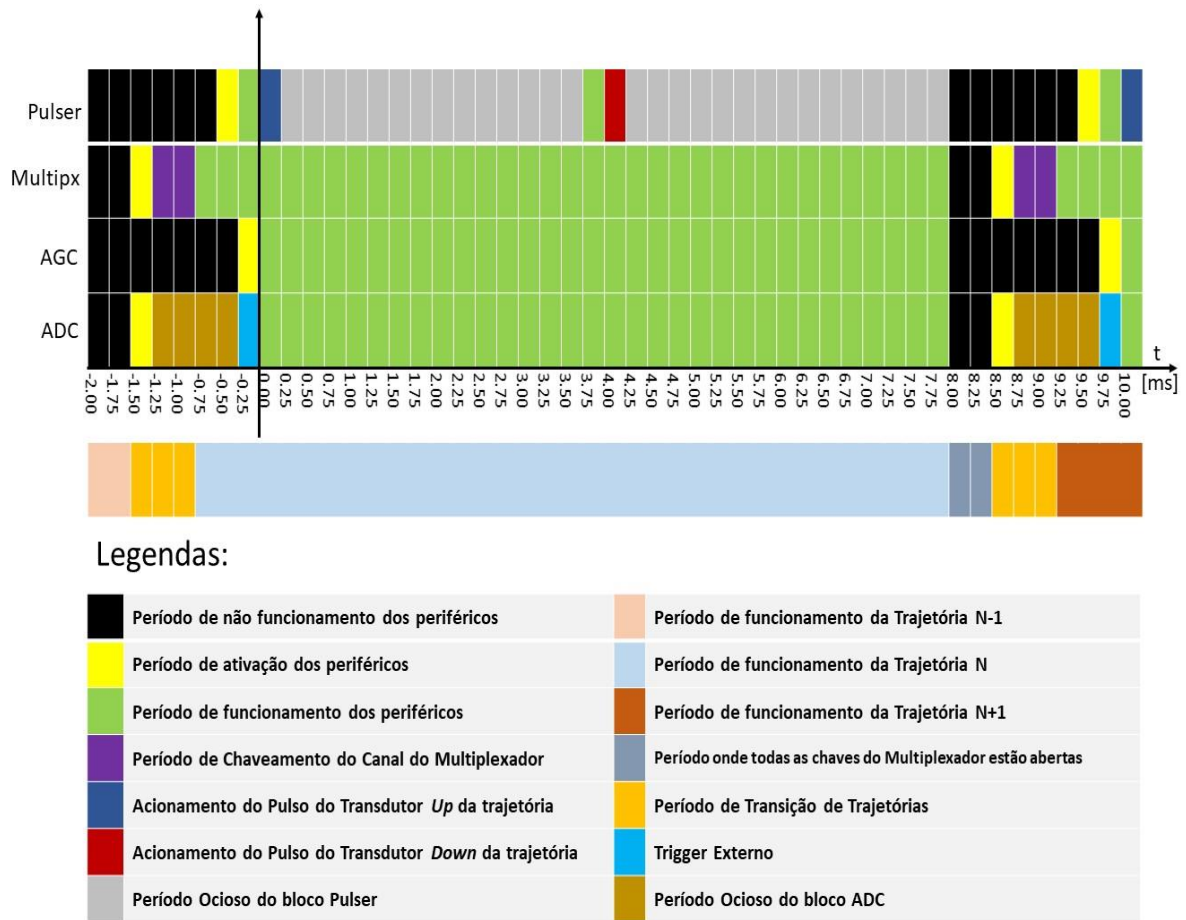


Figura 3.9. Diagrama de Temporização de Controle de Periféricos

3.3. Resultados do desenvolvimento do hardware

Esta parte descreve os resultados obtidos do desenvolvimento dos PCI (placa de circuito impresso) do protótipo e as duas versões de protótipo utilizadas durante o desenvolvimento. As seções seguintes detalham os resultados obtidos.

3.3.1. PCI Pulser

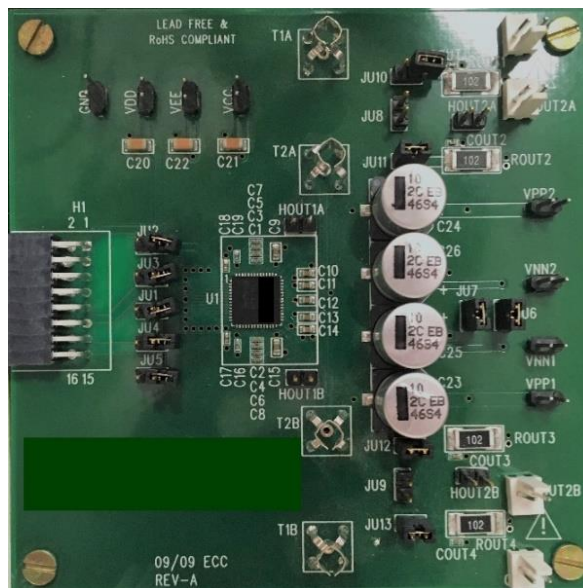


Figura 3.10. PCI do Pulser

A Figura 3.10 apresenta a placa principal do *Pulser*. A Figura 3.11 apresenta o PCI desenvolvido para o bloco *HV Supply* do sistema.

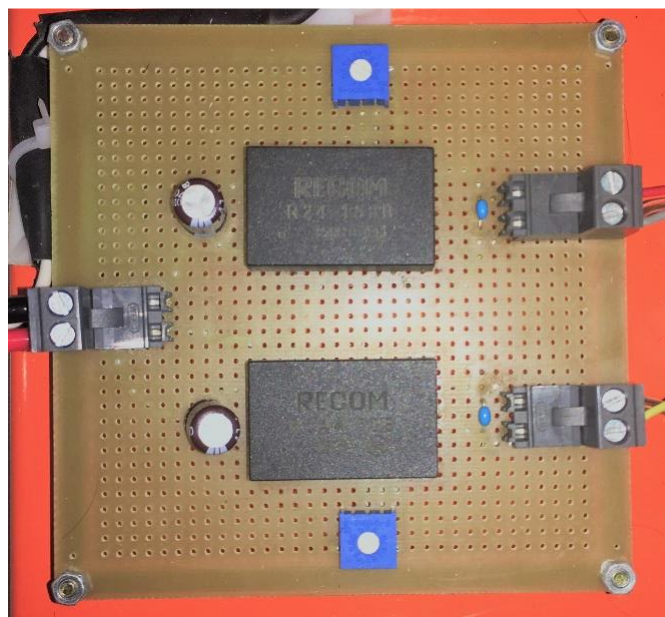


Figura 3.11. PCI do HV Supply

3.3.2. PCI Multiplexador

A Figura 3.12 mostra o PCI do Multiplexador. O circuito integrado é fixado na parte vermelha da placa. Os terminais de saídas para os transdutores são os componentes cinza na Figura 3.12 e são descritos por números de SW1 a SW16.

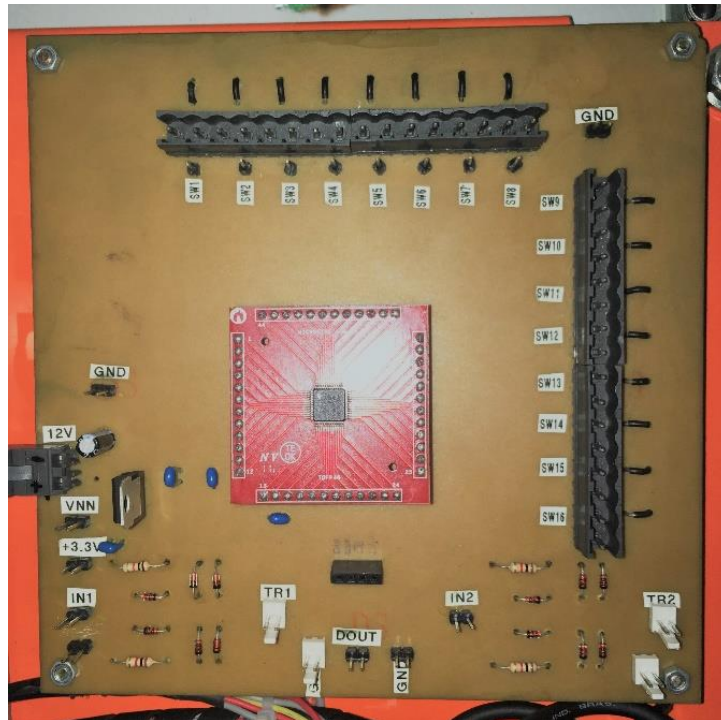


Figura 3.12. PCI do Multiplexador

3.3.3. PCI AGC

A PCI do AGC é mostrada na Figura 3.13. É dividida em duas partes: a primeira parte, placa mais à esquerda, é o componente de amplificação, enquanto a outra parte é a placa de controle do amplificador.

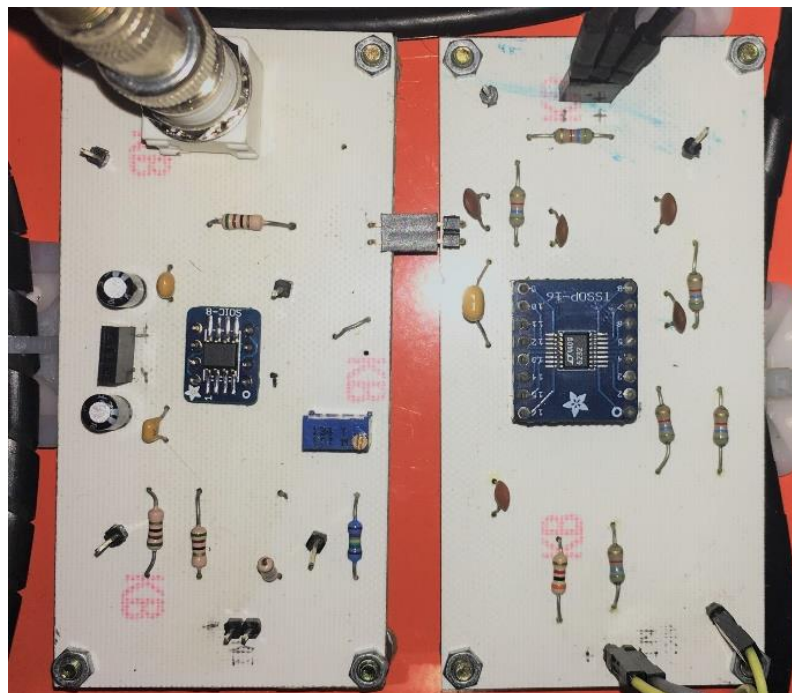


Figura 3.13. PCI do AGC

3.3.4. Sistema de Aquisição de Dados

A Figura 3.14 mostra o componente de aquisição de dados. Trata-se de um sistema dedicado de aquisição de sinais com alta capacidade de processamento e rápida transmissão de dados.

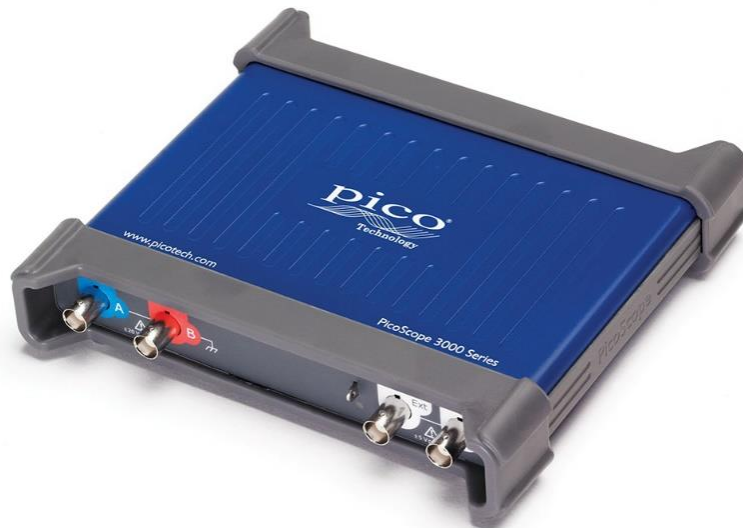


Figura 3.14. Sistema de Aquisição de Dados

3.3.5. Protótipo versão 1



Figura 3.15. Primeira Versão do Protótipo

A Figura 3.15 mostra a primeira versão do *hardware* do medidor de vazão. As integrações iniciais dos *hardwares* do medidor foram feitas em uma maleta facilitando a locomoção para lugares de testes.

3.3.6. Protótipo versão Final

A Figura 3.16 apresenta o protótipo final colocado em um quadro de comando especial com grau de proteção IP66. A Figura 3.16-a apresenta o interior do protótipo e a Figura 3.16-b apresenta o exterior do protótipo.



a- Interior da versão final do protótipo



b- Exterior da versão final do protótipo

Figura 3.16. Versão Final do protótipo

3.4. Comentários e discussões

Esta seção apresentou o desenvolvimento da eletrônica do Medidor de Vazão Ultrassônico Multi-Trajétórias. Foram descritos a eletrônica que compõem o circuito do MVU e o funcionamento dos principais periféricos do MVU. Nas seções seguintes serão tratados o processamento digital de sinais para a determinação dos tempos de trânsito e o cálculo de vazão. Também será mostrado o funcionamento do software do MVU.

Capítulo 4 – Processamento de Sinais e Dados do MVU

4.1. Introdução

A estimativa de vazão em um conduto forçado pela técnica de tempo de trânsito do pulso ultrassônico é diretamente proporcional à diferença ($\Delta t = t_{UP} - t_{DOWN}$) entre o tempo de trânsito do pulso ultrassônico se propagando à montante ao escoamento (t_{UP}) e o tempo de trânsito se propagando à jusante ao escoamento (t_{DOWN}), como descrito no capítulo 2. Logo, uma técnica de estimativa de tempo de trânsito que forneça uma boa precisão é indispensável. Este capítulo tem como objetivo descrever algumas técnicas de medição de tempo de trânsito; relatar as técnicas de processamento digital de sinais de estimativa de tempo de trânsito utilizadas no Medidor de Vazão Ultrassônico (MVU); mostrar o processamento digital de sinal de controle do AGC (*Automatic Gain Control*); e os algoritmos envolvendo os cálculos de vazão.

4.2. Teoria de medição de Tempo de Trânsito

O método de tempo de trânsito baseia-se no princípio de emissão e recepção de ondas ultrassônicas e na medição do tempo de propagação de um sinal ultrassônico entre um transdutor transmissor e um transdutor receptor, Figura 4.1. Este tempo de propagação é definido na literatura como Tempo de Trânsito (*Transit Time*) ou *Time-of-Flight* (ToF) [46].

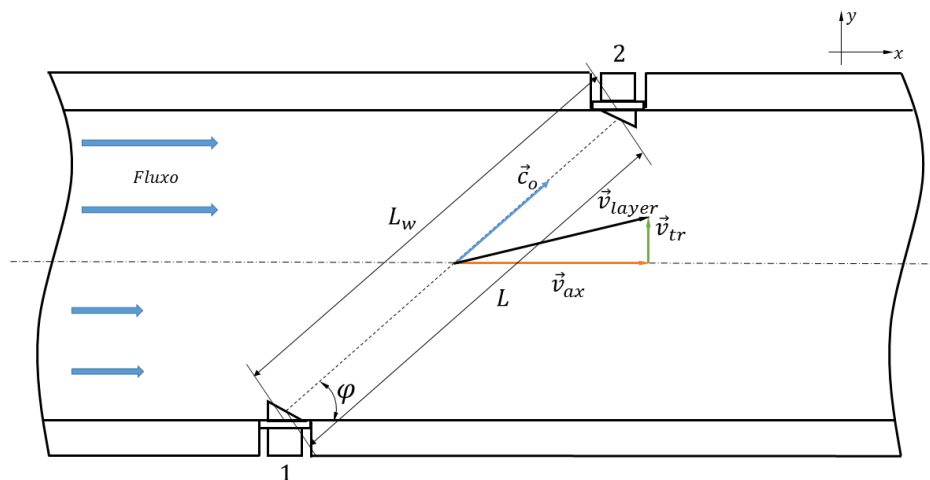


Figura 4.1. Medição de Tempo de Trânsito

Como dito em seções anteriores, a vazão volumétrica do fluido em um duto é diretamente proporcional à diferença entre o tempo de propagação dos pulsos ultrassônicos contra e a favor ao escoamento ($t_{up} - t_{down}$). Logo, o que define um ótimo equipamento de medição de vazão ultrassônico é a capacidade de o mesmo medir com precisão e exatidão os tempos de trânsitos das trajetórias acústicas para estimar com maior confiança a vazão do fluido no duto.

A literatura aborda várias técnicas de medição de ToF, desde circuitos integrados dedicados a medir ToF até técnicas avançadas de processamentos digitais de sinais [46]. A grande maioria das técnicas de estimativa de tempo de trânsito consiste em um sistema microcontrolado. Como mostrado em Webster [9], a técnica mais comum de medição de ToF baseia-se em técnicas envolvendo dois contadores de tempo, onde um contador calcula o tempo com um relógio de precisão N_t e o outro é um contador de número de amostras N_n . A relação entre estas duas medições de tempo distintas fornece o valor de ToF. A Figura 4.2 ilustra o diagrama de bloco de medição de tempo mostrado em Webster [9].

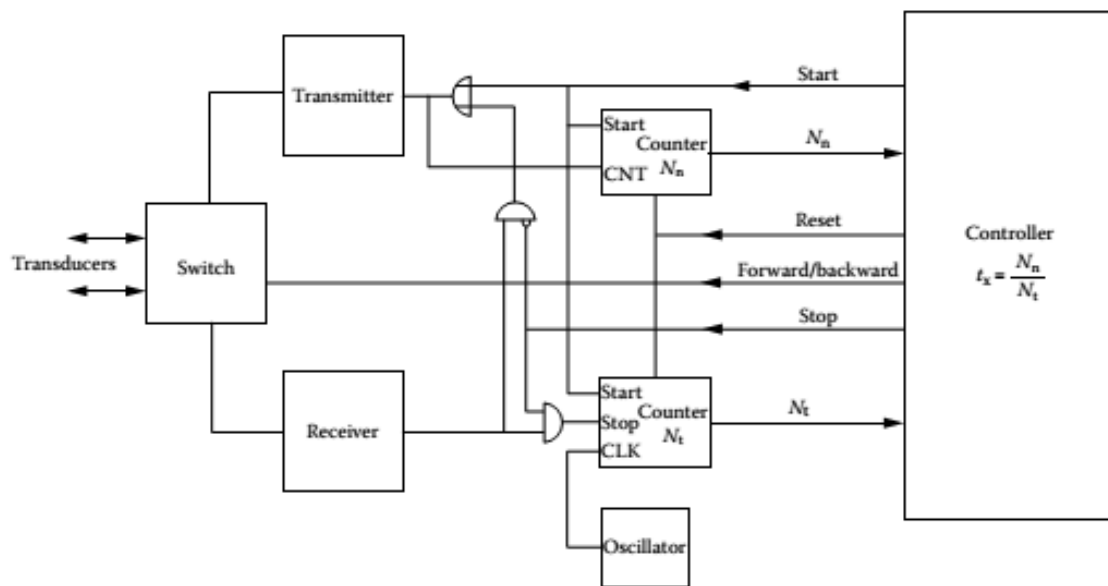


Figura 4.2. Diagrama de bloco de medição de tempo de trânsito, Referência: Webster [9]

4.2.1. Técnicas de estimativa de Tempo de Trânsito

Na literatura é possível encontrar diferentes técnicas de estimativa de ToF, as quais se baseiam em propriedades distintas da propagação de onda em um meio. Quatro principais parâmetros de sinais podem ser usados para estimar ToF: a amplitude do sinal;

a fase do sinal; a frequência e o *group delay* [46]. Outro fator que influencia na estimativa do ToF é o formato da onda ultrassônica emitida pelos transdutores [27]. As ondas emitidas pelos transdutores podem ser contínuas no tempo, moduladas em frequência, ou ondas de curta duração de tempo (descritas como pulsos ou ondeletas).

Técnicas que envolvem detecção de amplitudes de sinais ultrassônicos dependem da frente de onda e da influência do meio de propagação. A onda ultrassônica sofre uma convolução com o meio de propagação, alterando as características gerais da onda emitida pelo transdutor emissor. O transdutor receptor, portanto, receberá uma onda ultrassônica totalmente alterada por fatores como temperatura, pressão, alinhamento do transdutor e perturbações do meio que geram ruídos aleatórios [47]. Devido a estas influências, técnicas baseadas em amplitudes de sinais são vulneráveis a flutuações de amplitude e, portanto, suscetíveis a erros de estimativa de tempo.

Técnicas de estimativa de ToF que envolvem detecção da diferença de fase do sinal são mais robustas que técnicas utilizando amplitudes. O sinal mais comumente utilizado para esses tipos de técnicas é o de ondas ultrassônicas contínuas no tempo. Estas técnicas baseiam-se na diferença de fase entre as ondas ultrassônicas transmitidas pelo transdutor emissor e as ondas recebidas pelo transdutor receptor. A variação de fase entre estas ondas é proporcional ao tempo de propagação da onda ultrassônica.

Técnicas baseadas em medições de frequência, muitas vezes, estão associadas ao método de medição por efeito *Doppler*. Estas técnicas fundamentam-se na variação da frequência natural de oscilação das ondas ultrassônicas. Em contato com o meio de propagação, as ondas ultrassônicas podem sofrer variações na frequência que, ao serem detectadas, permitem que o tempo de trânsito possa ser estimado.

Outros aspectos que distinguem a estimativa de ToF estão relacionados às propriedades locais e globais das ondas ultrassônicas. As propriedades locais estão ligadas às características pontuais do sinal ultrassônico, enquanto propriedades globais usam as características de todo o sinal para parametrizar a estimativa do tempo de trânsito [46]. As propriedades locais mais comuns utilizadas para estimar ToF são o pico do sinal, níveis de limiar (*Threshold*) e cruzamentos de zero (*Zero-Crossing*) [48]. As propriedades globais utilizam técnicas avançadas de processamento de sinais em medição de tempo de trânsito usando Critérios de Máxima Verossimilhança (*Maximum Likelihood Criteria*) [49]. Semelhança entre o sinal de referência e o sinal recebido pode ser avaliada usando

técnicas como *Cross-Correlation*, *Maximum and Minimum of Difference L1 Norm* ou *Minimum of Difference L2 Norm* [46,50].

Técnicas mais recentes baseadas em estatísticas do sinal têm sido desenvolvidas explorando a variação da entropia do sinal [46,50].

4.2.2. *Cross-Correlation*

A Correlação Cruzada (*Cross-Correlation*) é uma operação que compara à similaridade existente entre dois sinais deslocados no tempo, um em relação ao outro. Para determinação de tempo de trânsito, o propósito da correlação cruzada é comparar dois sinais ultrassônicos, transmitidos e recebidos, de forma a extrair a informação de tempo de trânsito. Para este propósito, consideram-se duas sequências digitais $t_x(k)$ e $r_x(k)$ que se deseja comparar, em que $t_x(k)$ representa as amostras do sinal transmitido e $r_x(k)$ as amostras do sinal recebido [50].

Considerando-se as sequências de transmissão e recepção, o problema consiste em determinar o atraso de tempo entre a onda transmitida e recebida. Para este propósito, utiliza-se a operação de correlação ente os sinais $t_x(k)$ e $r_x(k)$ em que o índice da posição do valor de máximo pico do resultado da operação de correlação é relacionado à medição do ToF. A correlação de duas sequências é definida pela seguinte relação [49]:

$$CCF_k = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=1}^N r_x(n) t_x(n-k) \quad (Eq. 4. 1)$$

A estimativa de tempo de trânsito pela técnica de correlação cruzada se dá pela posição do máximo pico da Função de Correlação Cruzada (CCF- *Cross-Correlation Function*)

$$ToF_{CC} = \arg[\max(CCF_k)] \quad (Eq. 4. 2)$$

Considerando as formas de ondas dos sinais transmitidos $t_x(n)$ e recebido $r_x(n)$ pelos transdutores ultrassônicos, um exemplo é apresentado na Figura 4.3. Na Figura 4.4, apresenta-se o resultado da operação de correlação dos sinais ultrassônicos da Figura 4.3.

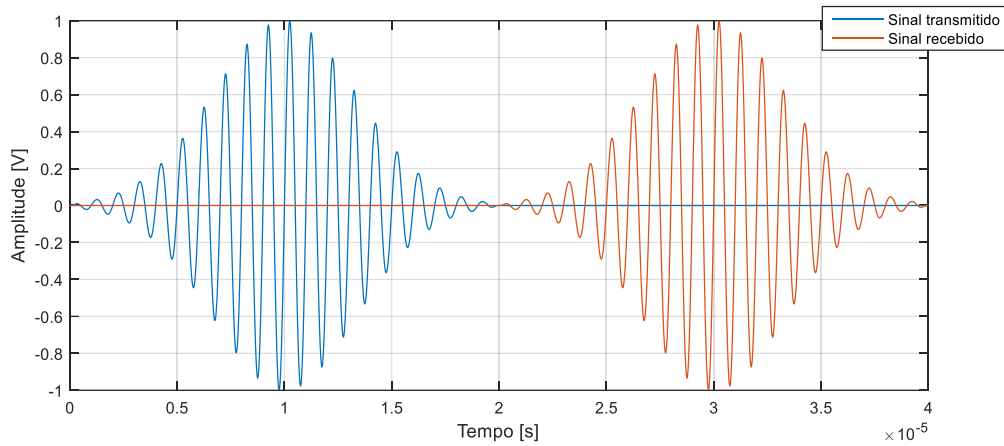


Figura 4.3. Sinais emitidos e recebidos

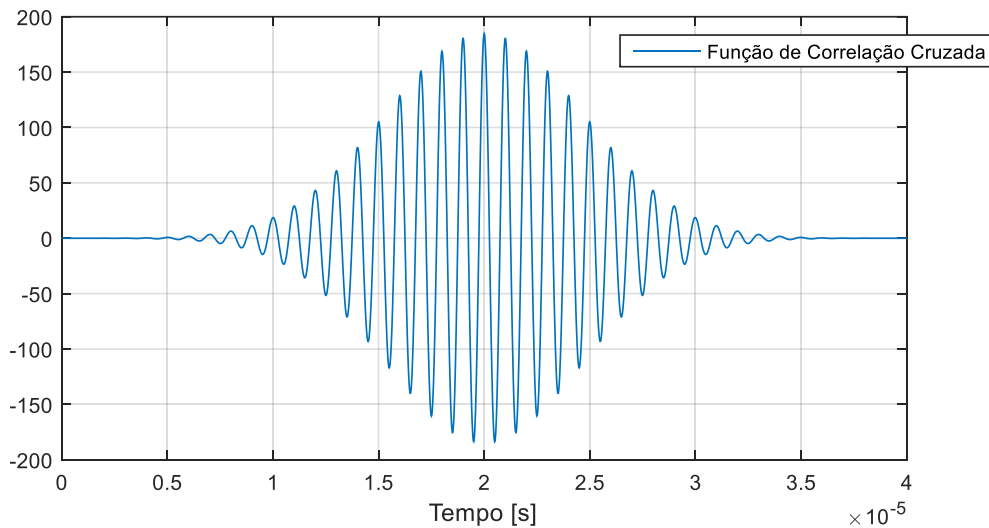


Figura 4.4. Correlação feita entre t_x e r_x

4.2.3. Interpolação

A interpolação é a estimativa das amostras desconhecidas ou perdidas de um sinal amostrado, utilizando-se uma média ponderada de um número de amostras conhecidas nos pontos de vizinhança desejados [51-53]. Os interpoladores são usados de várias formas na maioria dos sistemas de processamento de sinais e tomada de decisões. As aplicações de interpoladores incluem a conversão de um sinal de tempo discreto para um sinal de tempo contínuo. O objetivo da interpolação é obter uma reconstrução de alta fidelidade das amostras desconhecidas ou ausentes de um sinal. A ênfase da aplicação de interpolação em métodos de estimativa de tempo de trânsito é obter com maior precisão o valor de tempo de propagação, a partir de uma sequência de amostras, para obter valores perdidos no processo de amostragem. Como exemplo, a técnica de *zero-crossing*

detection, em um sistema discreto, necessita de uma função de interpolação, linear ou polinomial, para determinar o zero verdadeiro de um sinal amostrado [53].

Para estimar o ToF entre as amostras, aplicando a técnica de *cross-correlation*, o valor máximo da função de correlação cruzada é encontrado por interpolação de um número N_{int} de pontos da versão discreta da função de correlação cruzada [51]. No caso ideal, a função de interpolação *SINC* deve ser usada para a estimativa do ToF entre as amostras [52]. Mas, geralmente, em aplicações em tempo real, a velocidade de processamento de dados é fator limitante de aplicações de funções de interpolação complexas, exigindo técnicas de interpolação truncadas. Estas técnicas truncadas primeiramente localizam a posição do máximo pico discreto na $CCF(CCF_{k_{max}})$, conforme a Figura 4.5, e, após, é aplicada a função de interpolação truncada para determinar o valor de máximo pico interpolado, utilizando para isso um número reduzido de amostras, como apresentado na Figura 4.5. Aumentar a frequência de amostragem (f_s) reduziria a granularidade do eixo temporal [51]. Mas isso pode aumentar a complexidade do sistema se a subamostragem for usada, ou prolongar o tempo de processamento se a reamostragem no domínio de Fourier for usada. Portanto, é interessante estimar a subamostra do valor de ToF usando um fragmento de sinal muito mais curto.

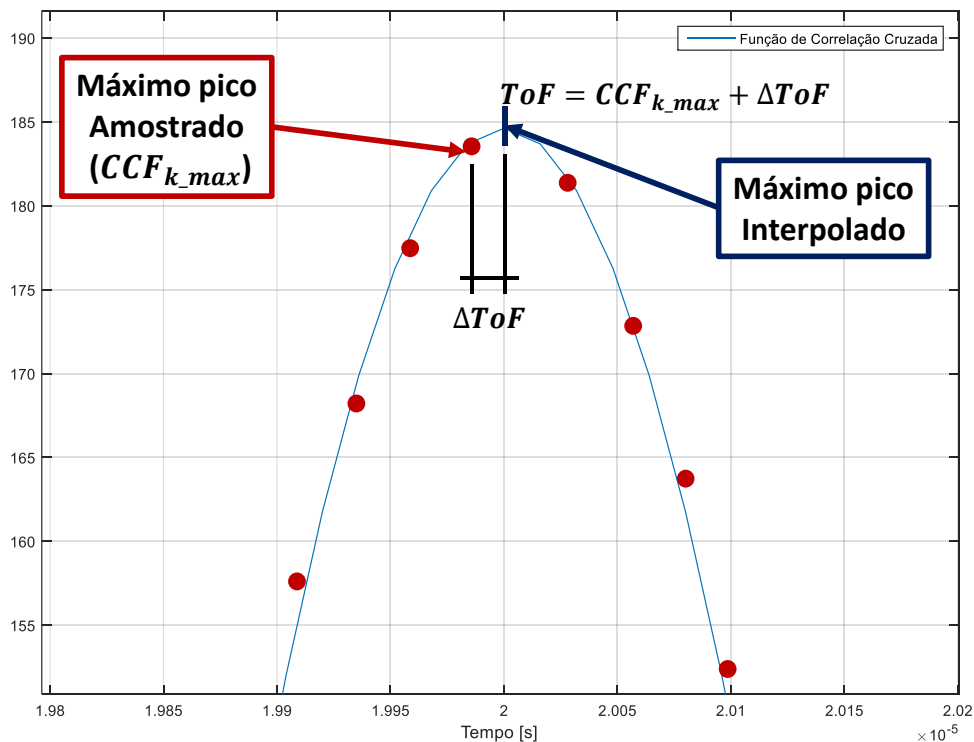


Figura 4.5. Processo de interpolação

A região de máximo pico de CCF exibe um comportamento de uma função do tipo quadrática [53]. Encaixando três pontos em torno do pico discreto m , x_{m-1} , x_m , e x_{m+1} , uma parábola pode ser aproximada, dando uma função analítica. O deslocamento da subamostra é do tipo

$$\Delta ToF_p = \frac{x_{m-1} - x_{m+1}}{2 \cdot f_s \cdot (x_{m-1} - 2 \cdot x_m + x_{m+1})} \quad (Eq. 4.3)$$

A função gaussiana poderia ter um mérito razoável se o envelope do intervalo em torno do pico CCF para um sinal de banda limitada for assumido semelhante a esta função [51]. O deslocamento da subamostra é

$$\Delta ToF_G = \frac{\ln(x_{m+1}) - \ln(x_{m-1})}{f_s \cdot (4 \cdot \ln(x_m) - 2 \cdot \ln(x_{m-1}) - 2 \cdot \ln(x_{m+1}))} \quad (Eq. 4.4)$$

O intervalo em torno do pico CCF pode ser assumido como uma fração da função harmônica [52]. A estimativa de deslocamento da subamostra é

$$\Delta ToF_{\cos} = -\frac{\theta}{f_s \cdot \omega_0}, \omega_0 = \arccos\left(\frac{x_{m-1} + x_{m+1}}{2 \cdot x_m}\right), \theta = \arctan\left(\frac{x_{m-1} - x_{m+1}}{2 \cdot x_m \cdot \sin \omega_0}\right) \quad (Eq. 4.5)$$

O atraso também pode ser estimado a partir do desvio de fase no domínio da frequência como mostrado em [46]. A estimativa de deslocamento da subamostra é

$$\Delta ToF_{FFT\phi} = \frac{\sum_{m=1}^M \frac{\phi(X_m^0) \cdot |X_m^0|^2}{\omega_m}}{M \sum_{m=1}^M |X_m^0|^2}, \quad (Eq. 4.6)$$

onde, $|X_m^0|^2$ espectro de energia, $\phi(X_m^0)$ fase de X_m e ω_m frequência na DFT (inglês, *Discrete Fourier Transformer*). Mais detalhes, consultar [51-53].

O valor resultante do tempo de trânsito é dado por

$$ToF = CCF_{k_{\max}} + \Delta ToF \quad (Eq. 4.7)$$

4.3. Processamento digital de sinais e dados do MVU

A Figura 4.6 ilustra o sistema do receptor do MVU com seus dois canais de aquisição de dados descritos como *canal A* e *canal B*. Ao iniciar o processo de aquisição

de sinais, as N trajetórias acústicas são multiplexadas e seus sinais são adquiridos pelos dois canais simultaneamente até que o *Buffer de Memória* do SAQ seja preenchido completamente. Após o término do preenchimento do *Buffer de Memória*, os sinais amostrados são transferidos para o SBC, para serem processados pelo processamento digital de sinais e dados (DSP). Cinco principais processos são feitos no DSP: estimativa dos valores de tempo de trânsito; processamento estatístico dos valores de tempo de trânsito; cálculo de vazão; processamento estatístico dos dados de vazão; e o processamento de dados do AGC.

4.3.1. Estimativa dos valores de tempo de trânsito (ToF)

Os sinais ultrassônicos por trajetória são amostrados numa frequência de amostragem (f_s) determinada pelo usuário e, ao preencher o *Buffer de Memória*, os dados são transferidos para o processamento digital de sinais e dados. O processo de estimativa de ToF inicia-se com os dados do *Buffer de Memória* sendo transferidos para a memória do SBC, como mostrado na Figura 4.6. Os dados são salvos como duas matrizes de dados (y_{DOWN} e y_{UP} representando o *canal A* e o *canal B*, respectivamente) contendo a dimensão $N_{buffer} \times N_s$, onde N_{buffer} representa a quantidade de vetores de sinais ultrassônicos transferidos (ou a quantidade de vezes em que o multiplexador foi multiplexado até o *Buffer de Memória* ser preenchido) e N_s é o número de amostras por vetor. Após, as matrizes denominadas y_{DOWN} e y_{UP} passam pelo algoritmo de estimativa de ToF N_{buffer} vezes.

O processo de estimativa de ToF é mostrado na Figura 4.7. Os vetores contendo as amostras dos sinais ultrassônicos y_{DOWN} e y_{UP} são filtrados por um filtro passa-faixa, tendo uma frequência central igual à frequência de ressonância dos transdutores ultrassônicos utilizados no processo de medição de vazão. Após a filtragem do sinal, o algoritmo de correlação cruzada é processado entre um sinal de referência ($x_{REF}(N)$) e os vetores y_{DOWN} e y_{UP} .

O sinal de referência é um sinal similar ao transmitido pelos transdutores ultrassônicos, servindo como o sinal t_x na função de correlação cruzada da Eq. 4.1, a Figura 4.8 apresenta um sinal ultrassônico de referência. O sinal de referência é determinado a partir de uma amostra dos sinais ultrassônicos dos transdutores utilizados

no processo de medição de vazão e o mesmo passa por um tratamento digital de sinais antes de ser armazenado para servir como padrão na correlação cruzada.

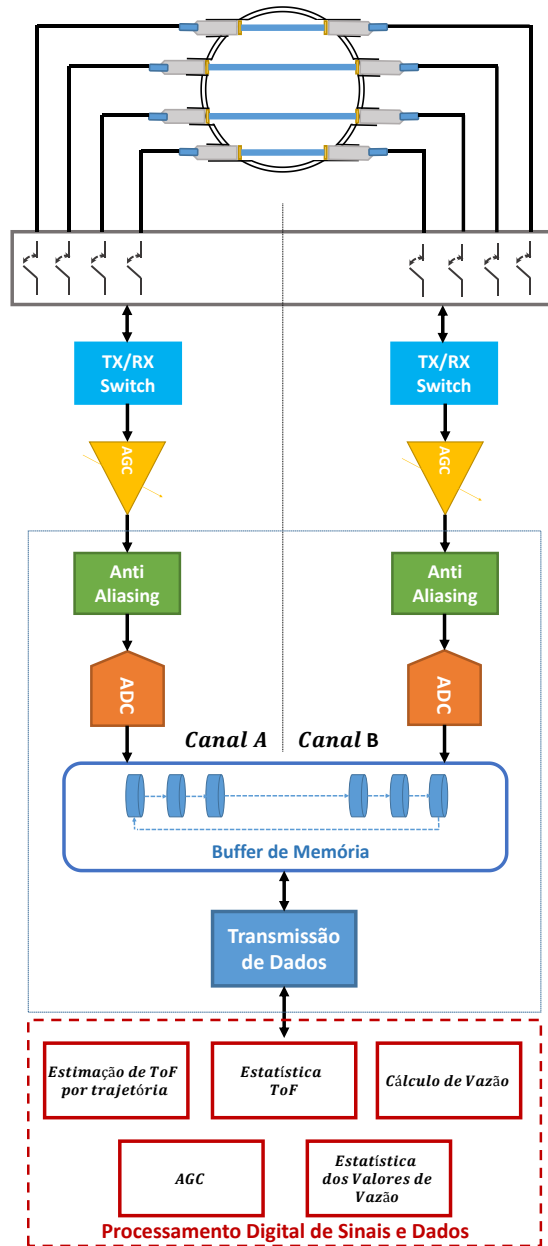


Figura 4.6. Receiver do MVU mostrando os canais A e B

A correlação é dada entre $x_{REF}(N)$ e y_{DOWN} e $x_{REF}(N)$ e y_{UP} , como mostrado na Figura 4.9, determinando duas CCF distintas, CCF_{DOWN} e CCF_{UP} . Após passar pelo processo da função de correlação cruzada, os pontos de máximos das CCF , Max_{DOWN} e Max_{UP} , são determinados e o algoritmo de interpolação é utilizado para encontrar os valores interpolados de máximo da CCF , ΔToF_{DOWN} e ΔToF_{UP} . O algoritmo de interpolação utilizado é o parabólico, descrito pela Eq. 4.3. Os valores de ΔToF_{DOWN} e

ΔToF_{UP} são somados ao Max_{DOWN} e Max_{UP} , respectivamente, dando os valores de tempo de trânsito *down* e *up*, ToF_{DOWN} e ToF_{UP} , da respectiva trajetória acústica. O algoritmo é feito N_{buffer} vezes até que toda as linhas das matrizes y_{DOWN} e y_{UP} sejam utilizadas. Os valores de ToF_{DOWN} e ToF_{UP} são agrupados por trajetórias. O total de ToF_{DOWN} e ToF_{UP} calculados por trajetória é dado por $N_p = \frac{N_{buffer}}{N_T}$, onde N_T é o total de trajetórias utilizadas.

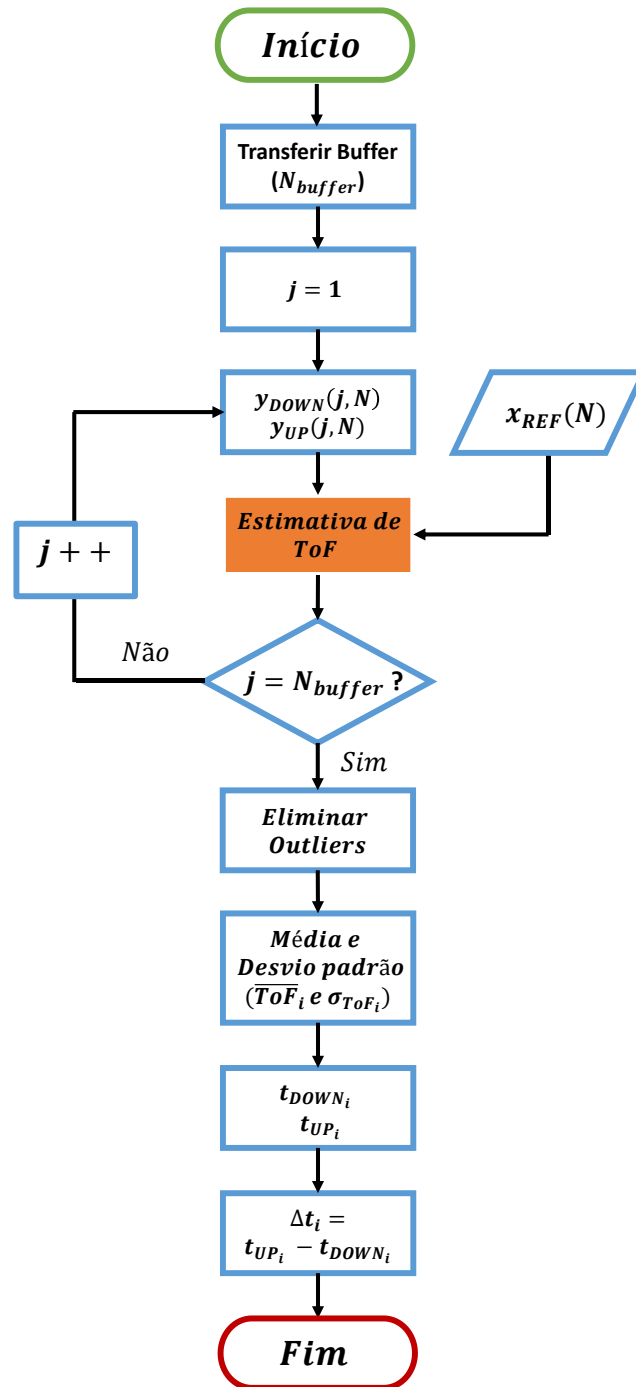


Figura 4.7. Fluxograma de Estimativa de ToF

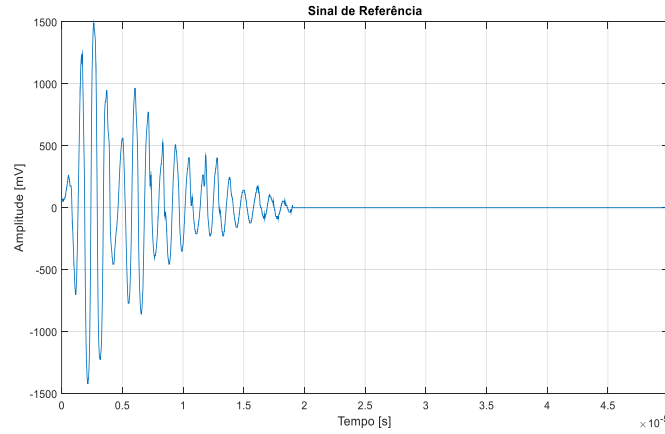


Figura 4.8. Sinal de referência

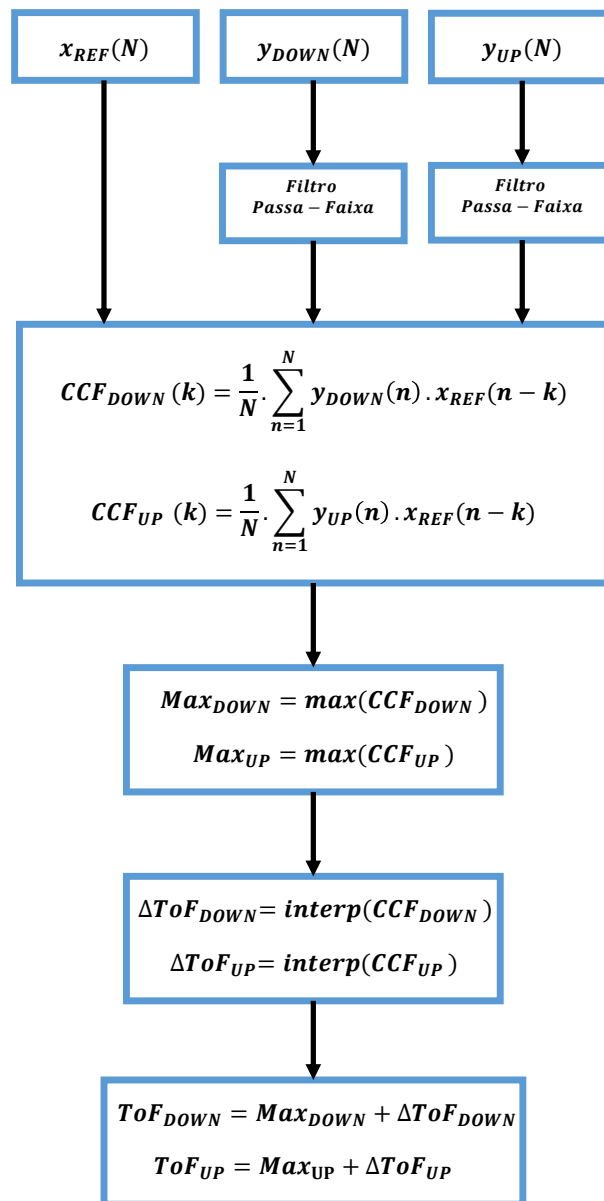


Figura 4.9. Algoritmo de Processamento de ToF

4.3.2. Processamento estatístico dos valores de tempo de trânsito

Um processamento estatístico é feito para os N_p valores de tempos de trânsitos calculados para cada trajetória acústica envolvida no processo de medição de vazão, Figura 4.7. Um algoritmo de eliminação de medidas discrepantes, denominados *outliers*, é realizado de acordo com o descrito em [59-60]. Estes valores representam estimativas de tempo de trânsito que se destoam do valor médio de um conjunto de amostras de tempo de trânsito. Eliminando os valores de *outliers*, uma média e um desvio padrão são determinados para as trajetórias, conforme descrito em *Montgomery* [54]. E, por fim, um valor de diferença de tempo de trânsito (Δt_i , onde i representa a trajetória) é determinado para cada trajetória.

4.3.3. Cálculo de vazão volumétrica

Para calcular a vazão volumétrica a partir dos dados de tempo de trânsito, dois algoritmos foram desenvolvidos, um para calcular as velocidades axiais médias (\bar{v}_{ax_i}) por trajetória e outro para determinar a vazão volumétrica (Q_v). Os algoritmos foram desenvolvidos baseados na teoria do capítulo 2 e no apêndice I.

4.3.3.1. Cálculo de velocidades axiais médias (\bar{v}_{ax_i})

O cálculo de \bar{v}_{ax_i} por trajetória é dado pela expressão Eq. 2.35 do capítulo 2. A Figura 4.10 mostra o algoritmo de cálculo de \bar{v}_{ax_i} . O processo se inicia pelos dados de entrada Δt_i , t_{UP_i} , t_{DOWN_i} , L_i e φ_i onde i é o índice de trajetórias. Primeiramente, uma constante C_i é calculada e, então, o valor \bar{v}_{ax_i} é calculado através dos valores de Δt_i , t_{UP_i} e t_{DOWN_i} . A velocidade axial média é calculada para cada trajetória. Os dados são armazenados na memória.

4.3.3.2 Cálculo da vazão volumétrica a partir das velocidades axiais médias

O valor da vazão volumétrica é determinado através do algoritmo representado pela Figura 4.11. Os dados de entradas são lidos e os valores de vazões pontuais (q_i) são calculados por trajetórias. Os coeficientes de ponderação (w_i) são determinados pelo tipo de arranjo de trajetórias adotado na instalação do conduto e a técnica de integração numérica escolhida. Os arranjos mais empregados são de quatro trajetórias e o de oito trajetórias, separados em dois planos acústicos. Para o cálculo de um arranjo de quatro trajetórias, as vazões pontuais (q_i) calculadas são somadas e multiplicadas por uma

constante $D/2$ e também por um fator de correção k_{cor} . Após, os valores de vazão volumétrica (Q_v) são salvos.

Para arranjos divididos em 2 planos, o algoritmo da Figura 4.11 é aplicado individualmente para cada plano e, após isso, uma média aritmética é feita

$$Q_v = \frac{Q_A + Q_B}{2} \quad (Eq. 4. 8)$$

Os cálculos são mais bem explicados no apêndice I.

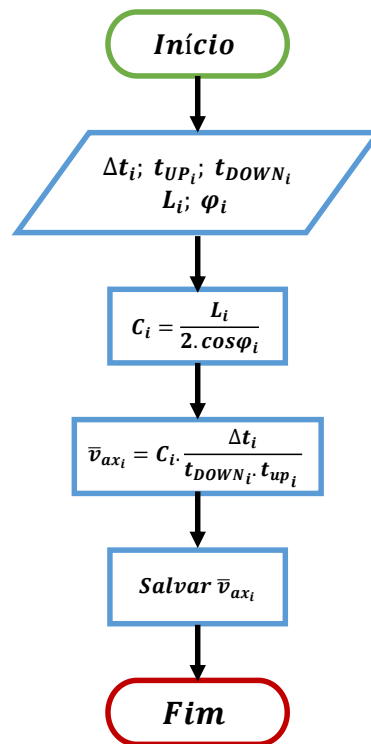


Figura 4.10. Algoritmo de cálculo de velocidade média axial

4.3.4. Estatística dos valores de vazão volumétrica

A cada ciclo de preenchimento do *Buffer de Memória* um valor de vazão volumétrica é determinado. Várias medidas de vazão volumétrica são realizadas durante um determinado tempo, e um valor médio e um desvio padrão são determinados a partir destes valores medidos. Também, valores de *outliers* são eliminados conforme o teste de Grubbs [59-60].

$$\bar{Q}_v = \frac{1}{N_Q} \cdot \sum_{j=1}^{N_Q} Q_{v,j} \quad (Eq. 4. 9)$$

$$\sigma_{Q_v} = \sqrt{\frac{1}{N_Q} \cdot \sum_{j=1}^{N_Q} (Q_{V,j} - \bar{Q}_V)^2} \quad (Eq. 4.10)$$

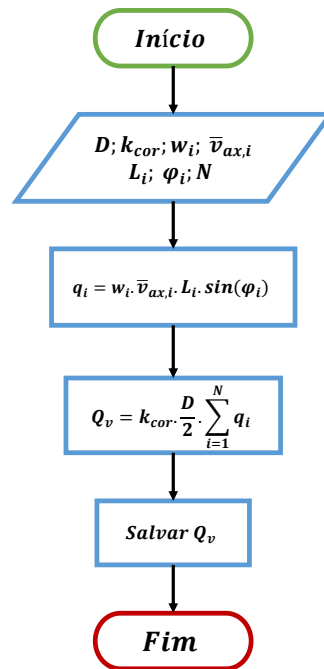


Figura 4.11. Algoritmo de Cálculo de Vazão

4.3.5. Algoritmo de controle do AGC (Automatic Gain Control)

O ajuste de ganho do AGC se dá através de um processamento digital de sinais, Figura 4.12. Os ganhos das trajetórias são ajustados individualmente e inicia-se com a aquisição de um número de amostra (N_{buffer}) dos sinais ultrassônicos ($y_{DOWN,j}$ e $y_{UP,j}$) da trajetória para cada *canal* (*A* e *B*). Os sinais ultrassônicos amostrados dos transdutores pertencentes à trajetória ($y_{DOWN,j}$ e $y_{UP,j}$), o valor de pico (V_p) e as N_{div} divisões dos sinais ultrassônicos são os dados de entradas do algoritmo de Ajuste de Ganho do AGC, mostrado na Figura 4.13. A variável N_{div} é um valor previamente definido no processo de configuração do algoritmo, que divide os vetores dos sinais ultrassônicos em quantidades determinadas para, nestas divisões, poder amplificar ou atenuar o sinal ultrassônico. Os sinais ultrassônicos amostrados ($y_{DOWN,j}$ e $y_{UP,j}$) são submetidos a uma filtragem digital por um *Median Filter* [55] e, em seguida, o envelope do sinal ultrassônico é determinado pelo valor absoluto da transformada de *Hilbert* [46].

O envelope do sinal ultrassônico é dividido em N_{div} divisões e os máximos picos locais são determinados para cada divisão N_{div} . Os sinais ultrassônicos são detectados levando em conta o nível de amplitude do sinal em relação ao ruído. Tais níveis de

amplitude de sinais são detectados através de um detector de *outliers*, teste de Grubbs [59-60], pois a amplitude do sinal buscado é um fator discrepante em relação à média das amplitudes do sinal. A média tende a ser o valor de pico do ruído onde o sinal ultrassônico se encontra. Após detectar os picos dos sinais ultrassônicos, os sinais $y_{DOWN,j}$ e $y_{UP,j}$ passam por uma máscara de ganho em que os valores detectados como *outliers* são convertidos para valores de ganho em dB, enquanto os valores restantes são convertidos para ganho mínimo. Isto é feito para que os sinais ultrassônicos sejam amplificados e os valores medianos (ruídos) sejam atenuados. O nível em dB é convertido para os níveis de tensão de ganho ($G_{N_{div}}$). Logo, o resultado deste processo de ganho é um vetor contendo N_{div} níveis de ganho distintos para cada transdutor da trajetória acústica. O processo é feito N_{buffer} vezes, obtendo duas matrizes com dimensão $N_{buffer} \times N_{div}$. Após, as médias são feitas para cada coluna das matrizes, obtendo um vetor de ganho médio com tamanho N_{div} . Logo, o vetor de $\bar{G}_{N_{div}}$ para os transdutores *down* e *up* é determinado. O próximo passo do algoritmo é converter os ganhos médios da trajetória em questão para sinais de *PWM* e, por fim, o PWM é armazenado na memória.

O processo é repetido para todas as trajetórias e os valores de PWM's são transferidos para o Controle de Periférico, como mostrado na Figura 4.12. Os valores de PWM's por trajetórias são sincronizados e os ganhos das N_{div} são dados nos momentos específicos do sinal ultrassônico da trajetória multiplexada naquele momento.

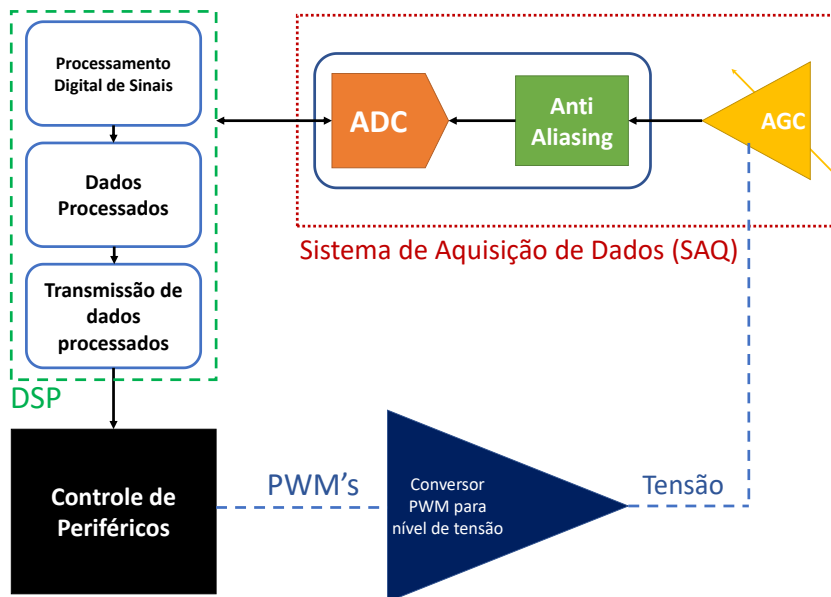


Figura 4.12. Diagrama de bloco de Ajuste de Ganho do AGC

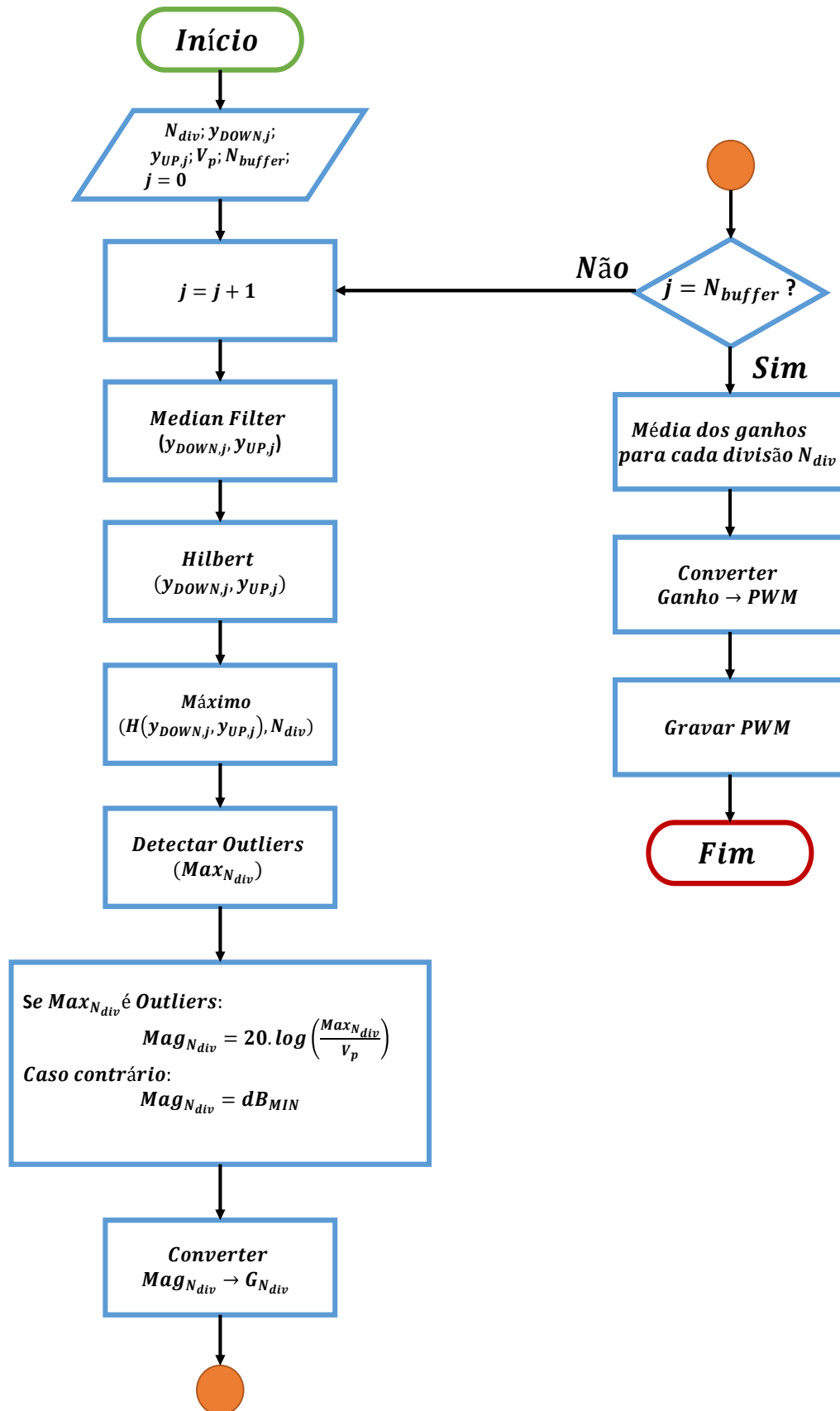


Figura 4.13. Algoritmo de Ajuste de ganho do AGC

4.4. Comentários e discussões

Este capítulo abordou o desenvolvimento do algoritmo de processamento digital de sinais que realiza as estimativas de tempo de trânsito, controle do AGC e os cálculos de vazão. A estimativa de tempo de trânsito baseou-se no conceito da teoria de Correlação Cruzada, na qual o máximo pico da função de Correlação Cruzada representa o tempo de trânsito dos sinais ultrassônicos. Outras técnicas foram simuladas e testadas no decorrer do desenvolvimento do mestrado.

Capítulo 5 – *Software* do Medidor de Vazão Ultrassônico

5.1. Funcionamento do *software*

O *software* do Medidor de Vazão Ultrassônico (MVU) apresenta quatro funções principais, como mostrado na Figura 5.1. O início do *software* começa com a entrada de dados do sistema através do Processo de Configuração. O arquivo responsável pelos dados de configurações possui todos os dados relacionados à instalação dos transdutores (diâmetro do conduto; comprimento das trajetórias; ângulos das trajetórias; etc.); dados de configurações de controle para o Controle de Periféricos; dados de configurações do SAQ; dados de configurações do algoritmo de processamento digital de sinais; e dados gerais necessários para o funcionamento do medidor.

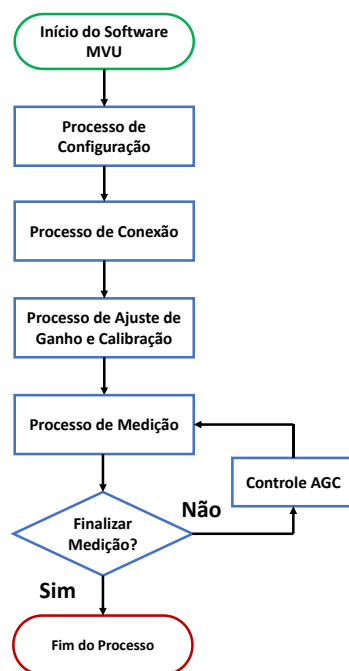


Figura 5.1. Diagrama de funcionamento do MVU

O processo de conexão tem como função comunicar com o Controle de Periféricos (responsável pelo controle do *hardware*) e o SAQ (responsável pelo processo de conversão de dados analógicos para digitais) e configurar estes blocos com os dados de

entradas. O processo de ajuste de ganho e calibração do sistema de medição tem como objetivo melhorar a qualidade do sinal ultrassônico recebido e melhorar a medição de vazão do MVU. Em seguida, a próxima etapa é o início do processo de medição. O processo de medição só é iniciado após todo o ajuste do sistema. O processo de medição fica medindo sinais ultrassônicos, calculando os dados de velocidade e vazão, salvando dados calculados e mostrando dados para o usuário de forma contínua até a interrupção do usuário. Também, no processo de medição de vazão, o controle do AGC fica funcionando em paralelo para averiguar os ganhos de sinais das trajetórias acústicas.

5.1.1. Funcionamento do processo de Configuração

Este processo inicia-se com o preenchimento da planilha de dados de medição responsável por configurar todos os dados do MVU. O especialista do processo de instalação do medidor configura esta planilha conforme a necessidade de cada local de medição. O processo seguinte é carregar a planilha no programa do MVU, o qual fica responsável por configurar as variáveis do sistema do *software* que são responsáveis pelo funcionamento do equipamento. O processo é simples e, para auxílio do especialista, há no protótipo do *software* telas de auxílio que mostram os dados carregados. A Figura 5.2 ilustra o processo de Configuração.

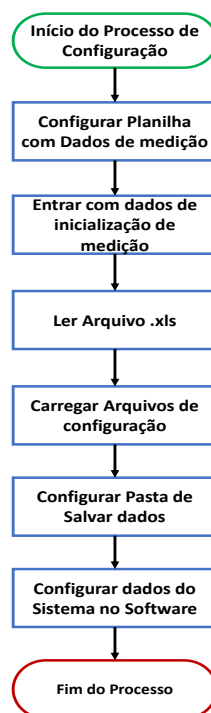


Figura 5.2. Diagrama do processo de Configuração do MVU

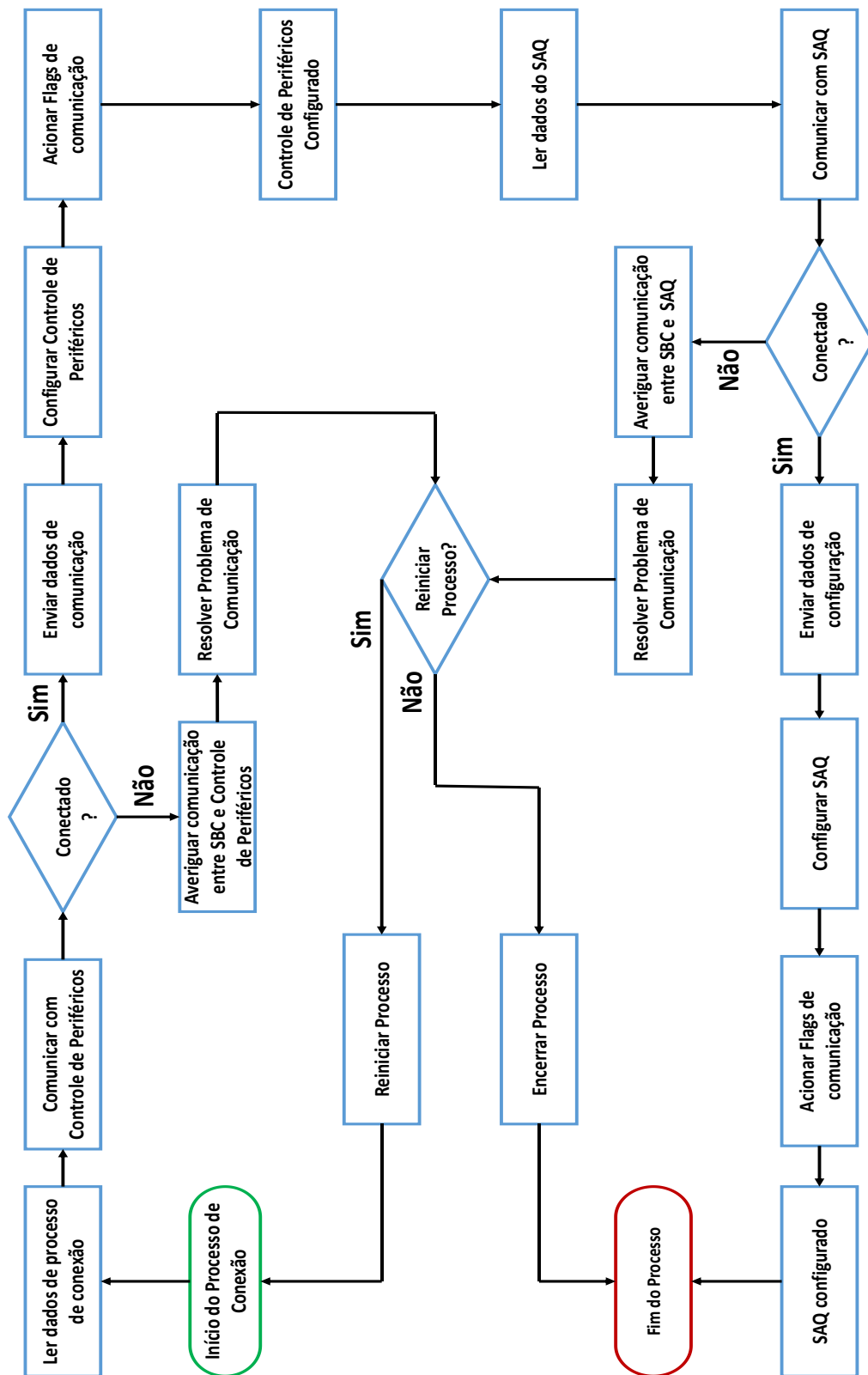


Figura 5.3. Diagrama do processo de Conexão do MVU

5.1.2. Funcionamento do processo de Conexão

O processo de conexão é feito em duas etapas, Figura 5.3. A primeira etapa faz a comunicação com o Controle de Periféricos. Logo ao iniciar o processo de comunicação, o *software* averigua se há uma comunicação entre o Controle de Periféricos e o SBC. Caso haja a comunicação, os dados de configuração do Controle de Periféricos são transferidos, o programa inserido no Controle de Periféricos é configurado com os dados enviados e os indicativos de conectividades (ou *flags*) são acionados, indicando correta configuração e comunicação com o Controle de Periféricos. Caso contrário, o *software* acusa mal conectividade com o periférico e tomadas de decisão do usuário deverão ser feitas para prover o correto funcionamento de comunicação com Controle de Periféricos. A segunda etapa é a comunicação com o SAQ. Os dados de configuração do bloco SAQ são lidos e transferidos após a comunicação entre SAQ e SBC. As *flags* de comunicação são acionadas, mostrando a correta comunicação com o SAQ. Caso não haja comunicação com o SAQ, o problema de comunicação deverá ser tratado pelo usuário.

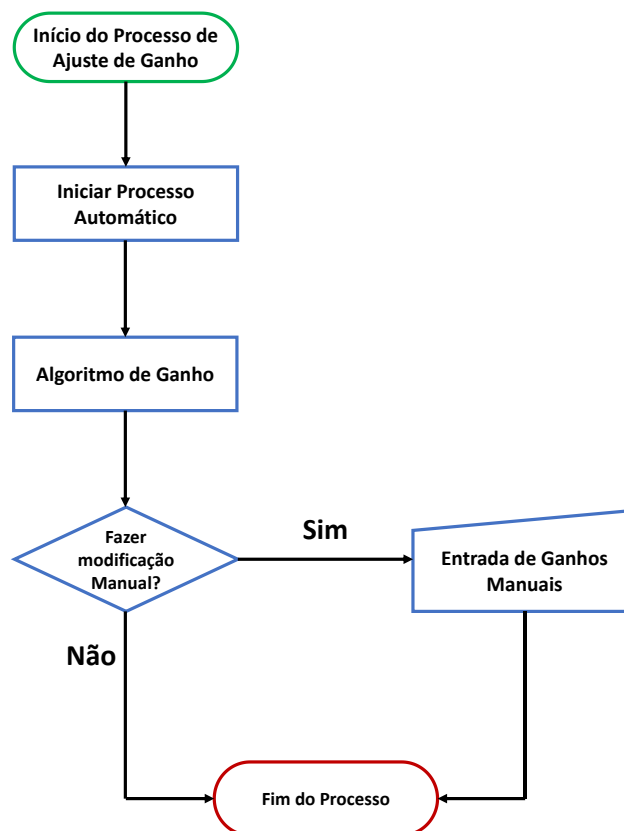


Figura 5.4. Diagrama do processo de Ajuste de Ganho do MVU

5.1.3. Funcionamento do processo de Ajuste de Ganho

O processo de ajuste de ganho é necessário para amplificar os sinais ultrassônicos dos transdutores, Figura 5.4. Um processo prévio de alinhamento de transdutores é feito para cada trajetória acústica. Após este ajuste preliminar, o processo de ajuste de ganho é iniciado. O ajuste automático é iniciado, fazendo com que o algoritmo de ajuste de ganho descrito no capítulo 4 seja acionado. Ao fim do algoritmo de ajuste de ganho, há a opção de modificar manualmente os ganhos por trajetória. Esta opção é recomendada para corrigir eventuais perturbações no sinal ultrassônico, e isto é feito individualmente para cada trajetória. Também, o algoritmo de ajuste de ganho permanece controlando os ganhos das trajetórias durante o processo de medição de vazão.

5.1.4. Funcionamento do processo de Medição

O diagrama de bloco de funcionamento do medidor de vazão é mostrado na Figura 5.5. O sistema se inicia com a leitura dos dados de configuração do sistema pelos blocos Controle de Periféricos e SAQ. Os dados de entrada são novamente configurados no *hardware* do MVU. Em seguida, os dados do ajuste de ganho são lidos pelo sistema principal do algoritmo. Também, uma calibração do MVU para $Q_v = 0$ (sem escoamento) é necessária para minimizar erros de estimativa de vazão.

Após os procedimentos anteriores, o ciclo de medição se inicia. Os transdutores enviam e recebem ondas ultrassônicas, as quais passam por um sistema de aquisição de sinais que, por sua vez, condiciona o sinal e faz a conversão do sinal analógico para o digital. Em seguida, na central de processamentos de sinais e dados, os algoritmos de processamento digital de sinais são acionados, o cálculo de tempo de trânsito é feito para cada trajetória, as velocidades médias axiais e a vazão são calculadas.

Outros dados também são calculados, como o número de Reynolds, viscosidade, velocidade do som, entre outros. Com todos os cálculos realizados, eles são armazenados e mostrados para o usuário do medidor de vazão. O processo fica em *loop* de medição até ser interrompido pelo usuário.

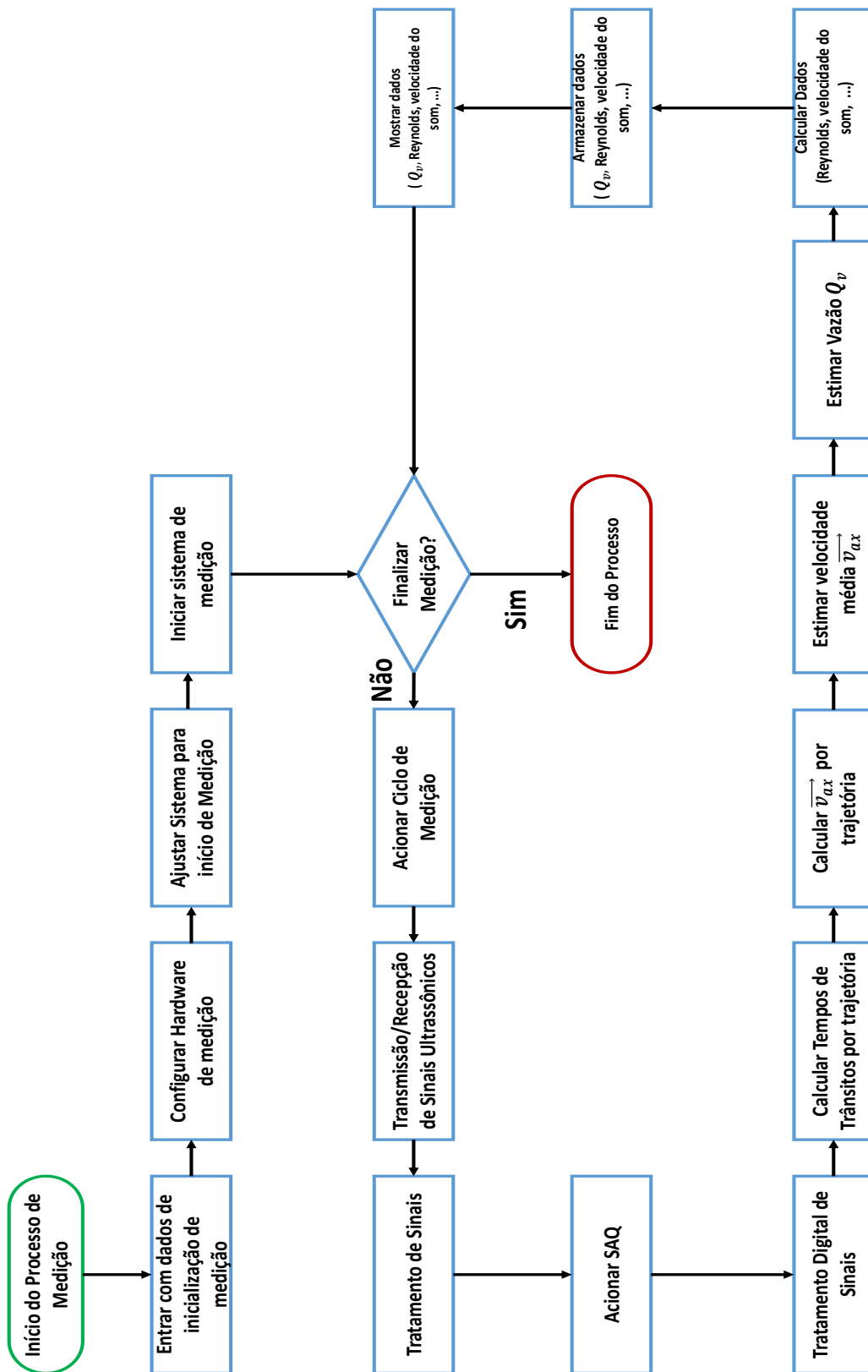


Figura 5.5. Diagrama do processo de Medição do MVU

5.2. Desenvolvimento do *software*

O projeto do *software* foi estruturado da seguinte maneira: levantamento das ações que o *software* deve realizar; levantamento de ferramentas do sistema; e telas que devem ser mostradas para averiguar o funcionamento do processo.

Todo o *software* foi feito no programa MATLAB®. O uso do MATLAB® foi escolhido pelos diversos recursos que possui e a facilidade de desenvolvimento.

5.2.1 Ações do sistema

As ações dos sistemas são as atividades que o *software* irá realizar periodicamente para que haja o correto funcionamento do sistema. As principais ações que o *software* deve gerenciar são:

- Comunicação com o MVU;
- Configuração de medição;
- Entradas e saídas de dados;
- Registros de eventos;
- Relatórios de funcionamento operacional do sistema.

5.2.2. Telas do sistema

Esta seção relata as telas criadas para o *software* do MVU.

5.2.2.1. Tela Configurar

É a tela responsável de entrada de dados de configuração do MVU. Sua função principal é carregar o arquivo .xls que configura todos os dados do medidor de vazão e, também, mostrar o local onde os dados devem ser salvos. Uma vez os dados carregados, há telas que auxiliam o usuário a saber as configurações carregadas do arquivo .xls. As telas são:

- **Geral:** descreve características gerais do produto: modelo; código do produto; datas e outras
- **Controle:** descrição de controle para aplicação do MVU
- **Aquisição:** dados relativos ao sistema de aquisição de dados

- **Transdutores:** detalhes relacionados aos transdutores utilizados na medição
- **As-Built:** características das instalações no conduto
- **Trajetórias:** dados de cada trajetória

5.2.2.2. *Tela Conectar*

Esta tela é dividida em três ações:

- **Conectar:** É a tela responsável por fazer a comunicação com o *hardware* do sistema. Apresenta as *flags* de comunicação que indicam se o sistema foi conectado ou não, além de mostrar alguns detalhes importantes sobre o processo de comunicação.
- **Calibrar:** é responsável por ajustar os ganhos iniciais do sistema
- **Teste:** é a tela que apresenta os sinais ultrassônicos recebidos pelas trajetórias

5.2.2.3. *Tela Principal*

Tela que contém informações gerais sobre o sistema em funcionamento. As principais funções: mostrar valores gerais das medições: vazão, velocidade do som, temperatura, pressão, viscosidade e densidade; e interromper e inicializar o processo de medição.

5.2.3. **Arquitetura do *software***

A arquitetura de *software* é apresentada na Figura 5.6. A primeira ação do *software* é apresentar a tela do programa. Após, as telas principais estão disponíveis para serem selecionadas e as ações executadas.

A arquitetura de *software* apresenta de forma geral os principais componentes que o programa contém. Como mostrado na Figura 5.6, há diversas funções que o *software* possui que levam em conta botões de selecionar telas, botões que executam ação e funções gerais do *software*. O bloco Botões de Selecionar Telas são todos os botões que comandam a seleção das telas. No total, o sistema possui três telas principais e dez sub telas. O bloco de botões de ação mostra todos os botões que, ao serem clicados, exercem uma ação no sistema. O bloco Funções consiste nas principais funções que o *software* exerce sob o MVU.

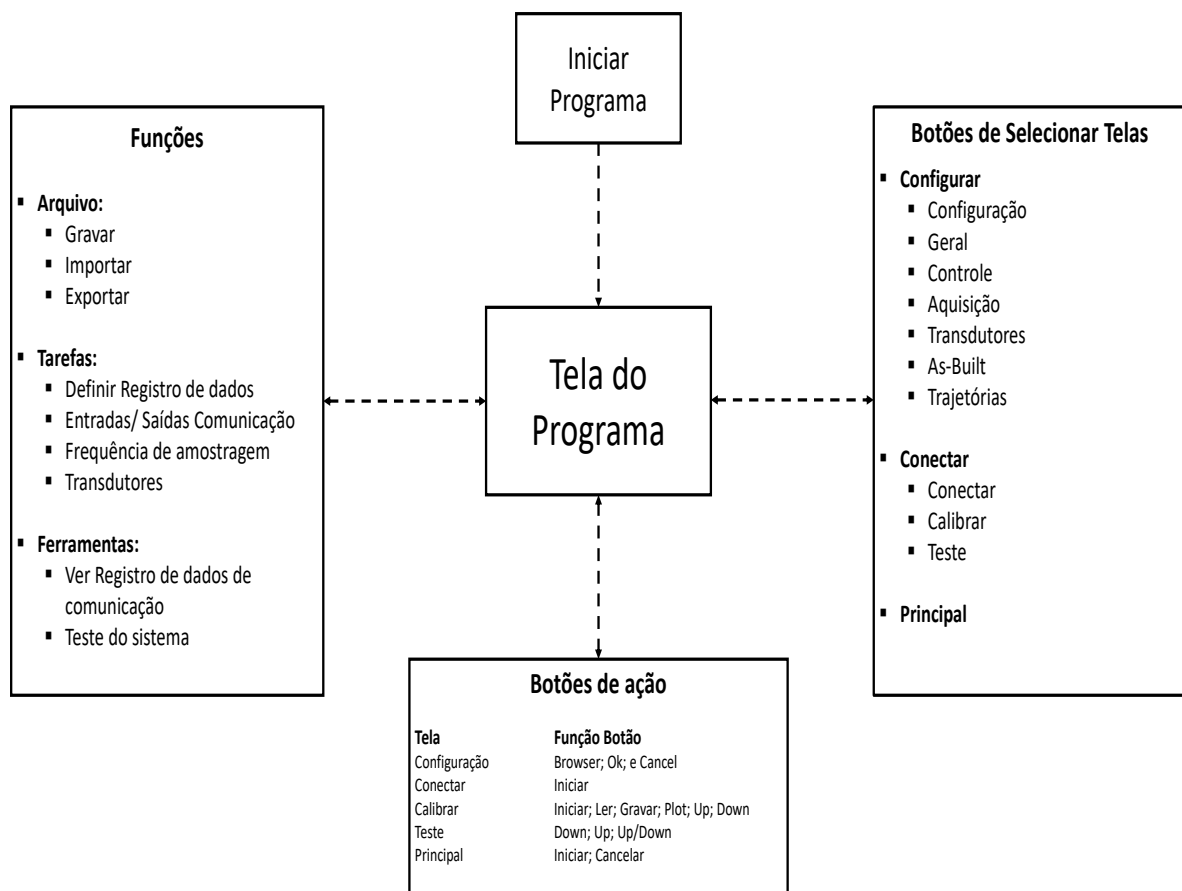


Figura 5.6. Arquitetura do software MVU

5.2.4. Diagrama de Uso

A Figura 5.7 ilustra o diagrama de uso do *software*. O diagrama de uso mostra de forma simplificada as funções que o usuário pode requisitar do *software*. Cada ação corresponde a uma função desenvolvida para que o *software* realize.

5.3. Resultados do *Software*

5.3.1. Telas relacionadas a parte de Configurar

A Figura 5.8 mostra a tela relacionada à configuração do MVU. Esta tela possui dois botões de ações *Browser* que servem para direcionar o diretório de salvar dados, *Save Path* e o de selecionar o arquivo de configuração do sistema, *Config File*. O botão *OK* é responsável por carregar os dados do arquivo de configuração, enquanto o botão *Cancel* limpa o diretório e o arquivo de configuração do sistema.

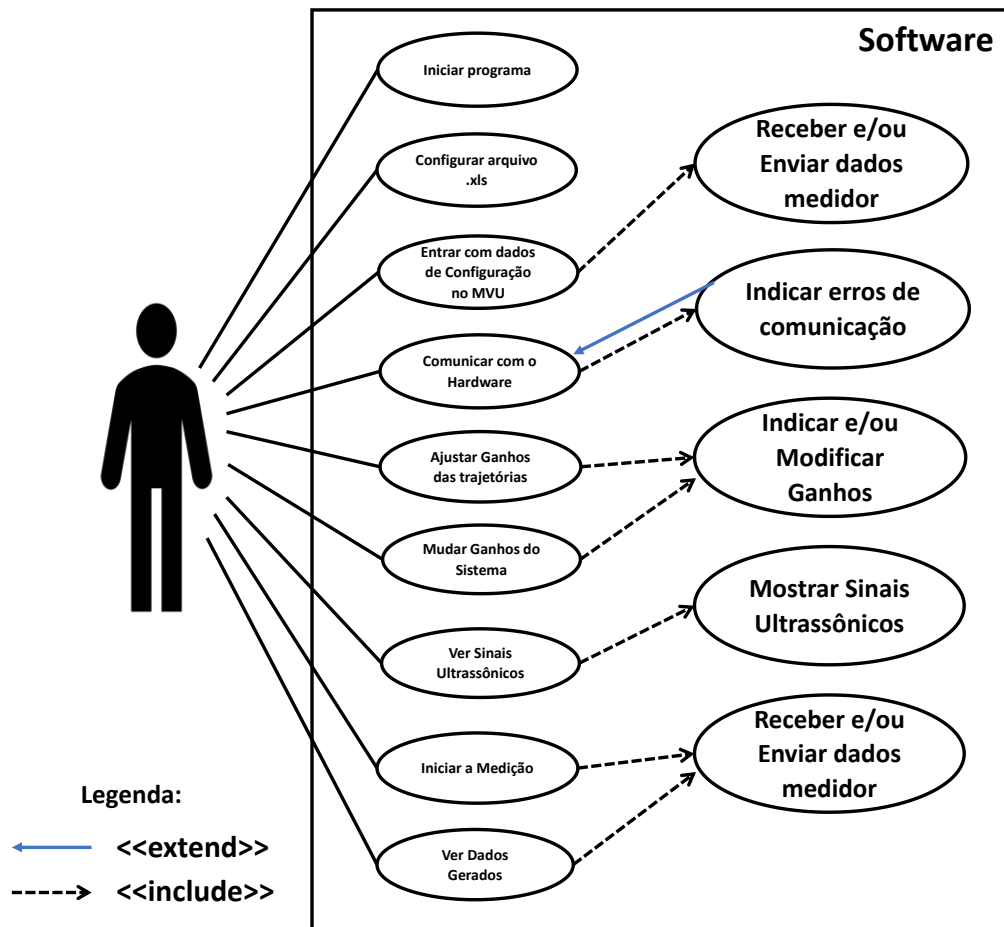


Figura 5.7. Diagrama de Uso do software MVU

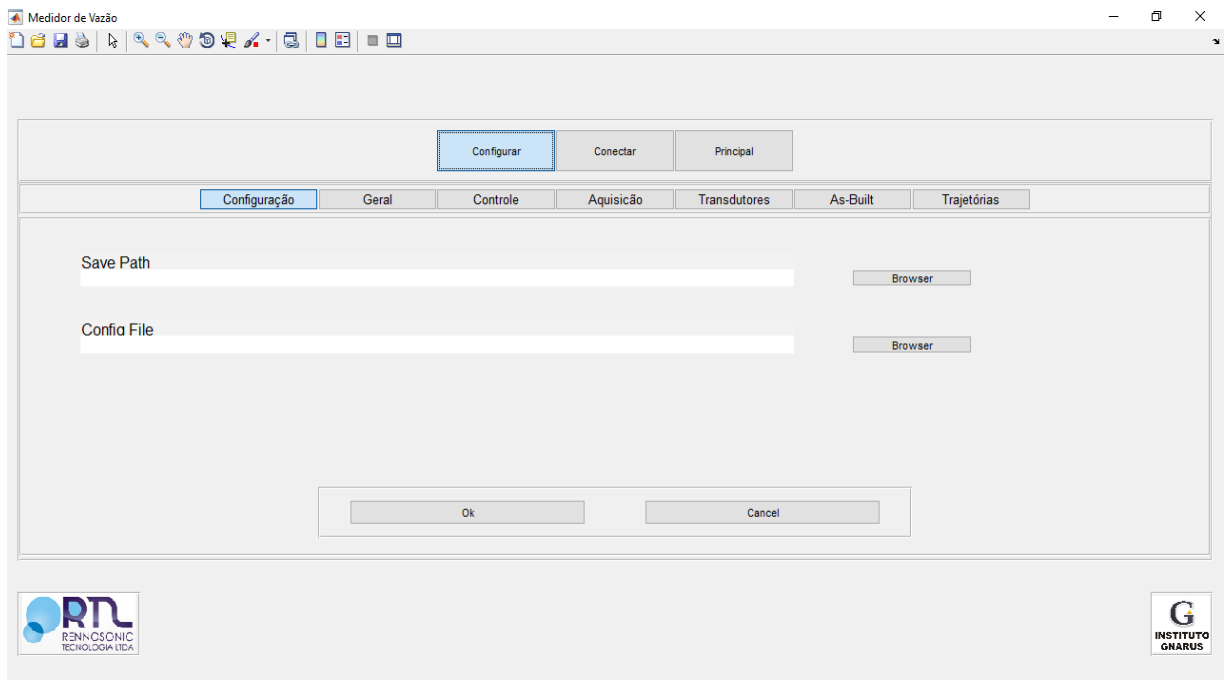


Figura 5.8. Tela Configuração

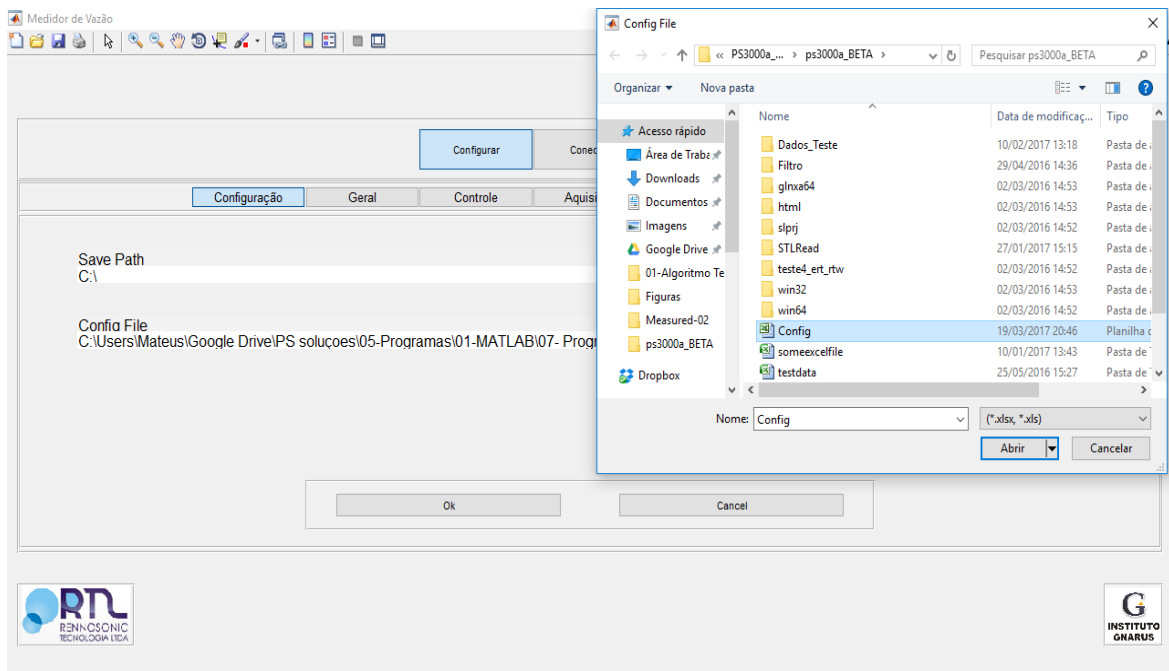


Figura 5.9. Exemplo da ação de Configuração do Sistema

A Figura 5.9 apresenta o arquivo *Config.xls* sendo selecionado para configurar o MVU. Também é possível observar que o diretório *C:* foi escolhido para salvar dados. A Figura 5.10 apresenta os dados gerais carregados do arquivo *Config.xls*.

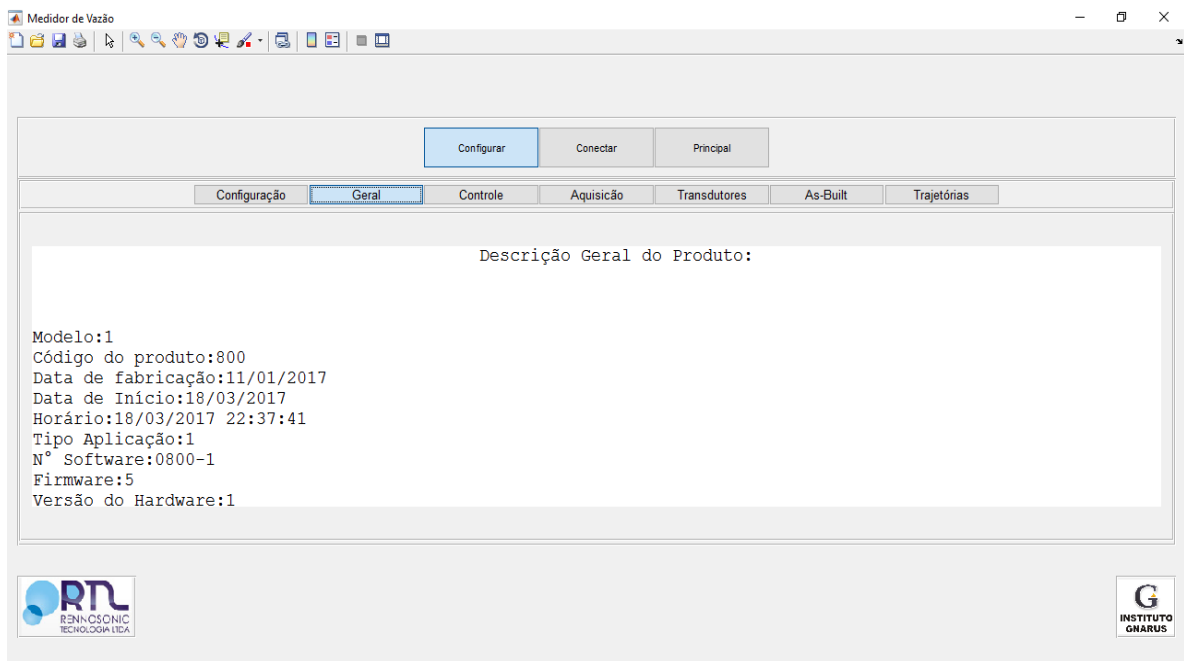


Figura 5.10. Tela Geral

A Figura 5.11 apresenta os dados de controle do MVU. Esta tela relaciona as características gerais do *hardware* com os dados de operação do MVU.

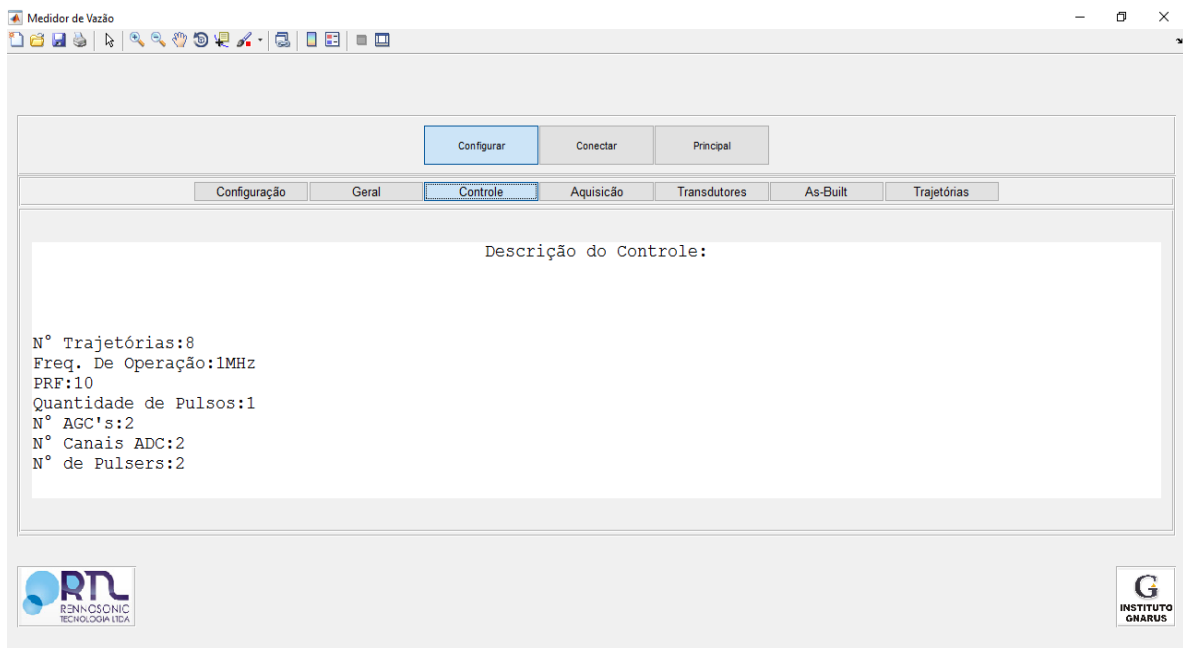


Figura 5.11. Tela Controle

A tela de Aquisição é apresentada na Figura 5.12. Esta tela relaciona os dados de configuração do SAQ.

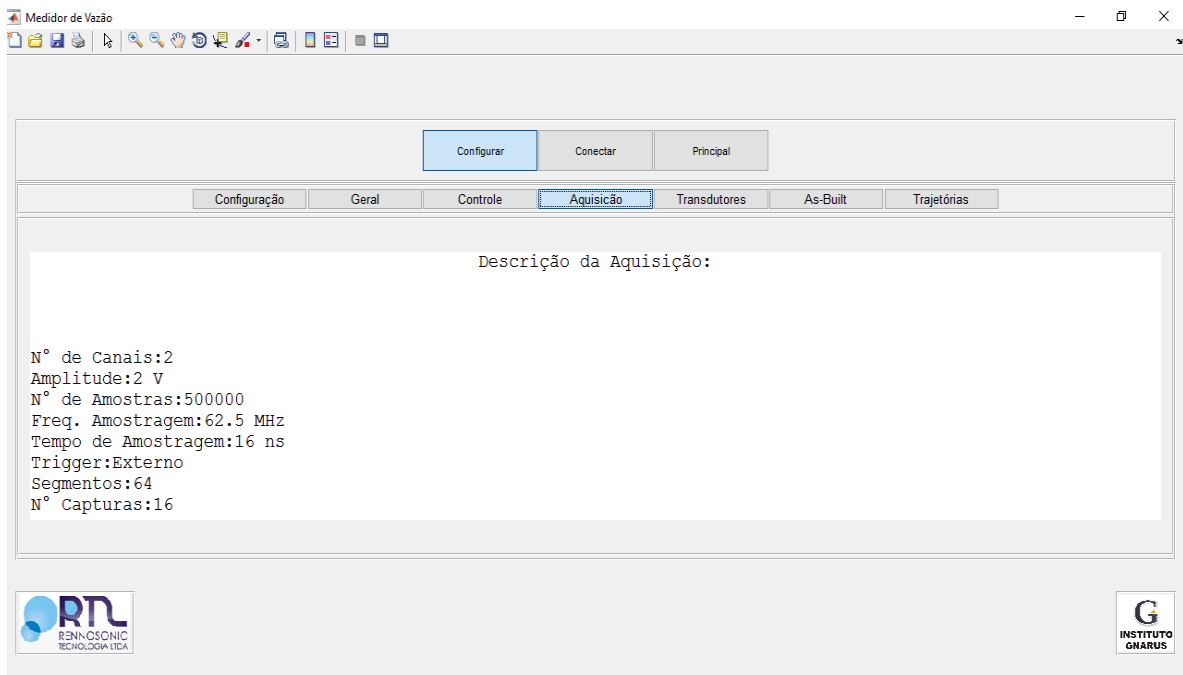


Figura 5.12. Tela Aquisição

A Figura 5.13 apresenta a tela de dados referentes aos transdutores utilizados nas medições. Há as características de números de transdutores, tipos de pulso de excitação, tensão do pulso e modelo dos transdutores.

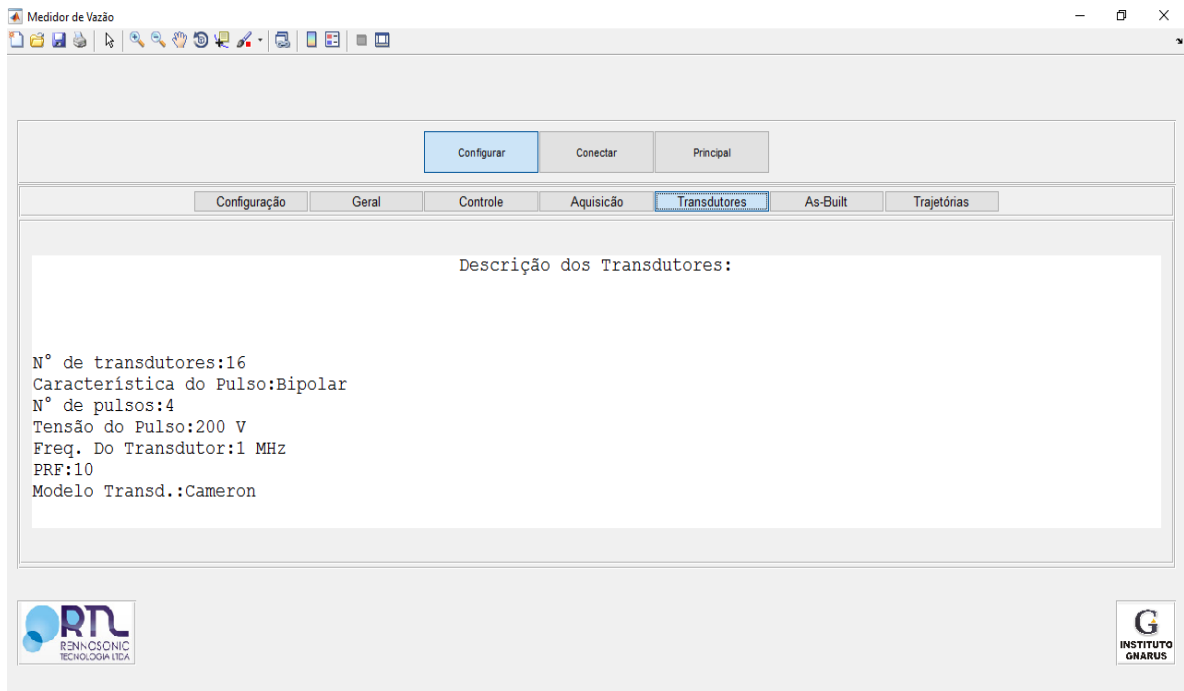


Figura 5.13. Tela Transdutores

Os dados referentes ao local de instalação do MVU estão relacionados à Tela apresentada na Figura 5.14.

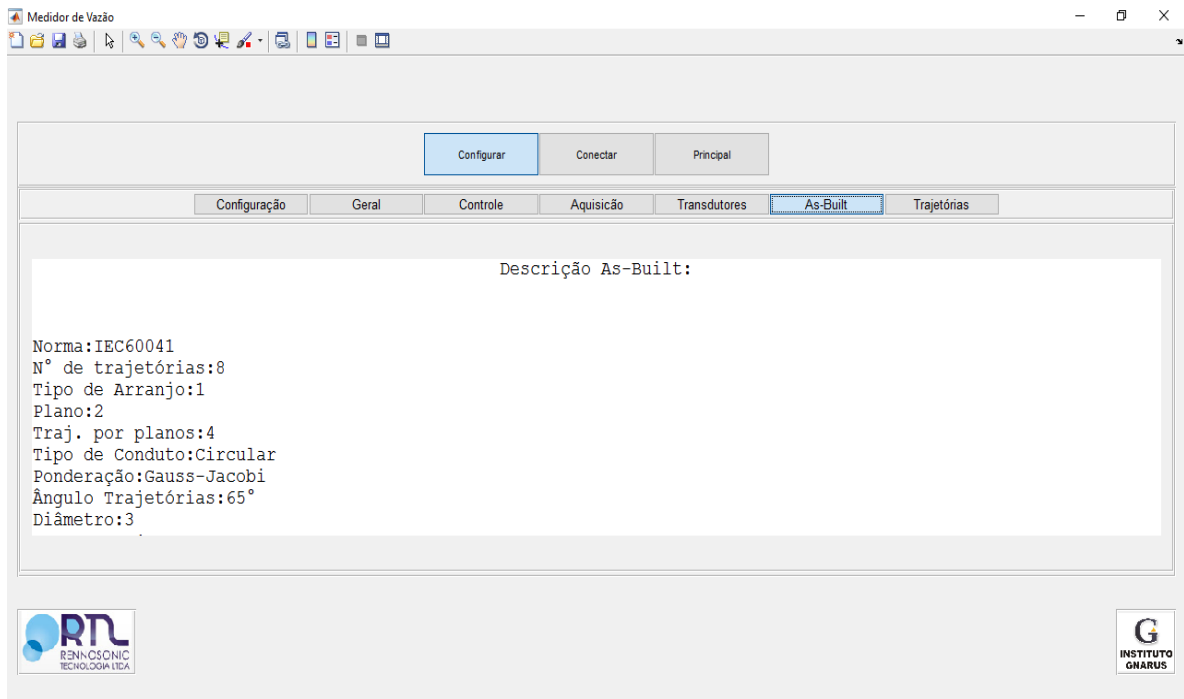


Figura 5.14. Tela As-Built

A última tela da parte de configuração está apresentada na Figura 5.15. A tela relaciona todas as características das trajetórias do sistema.

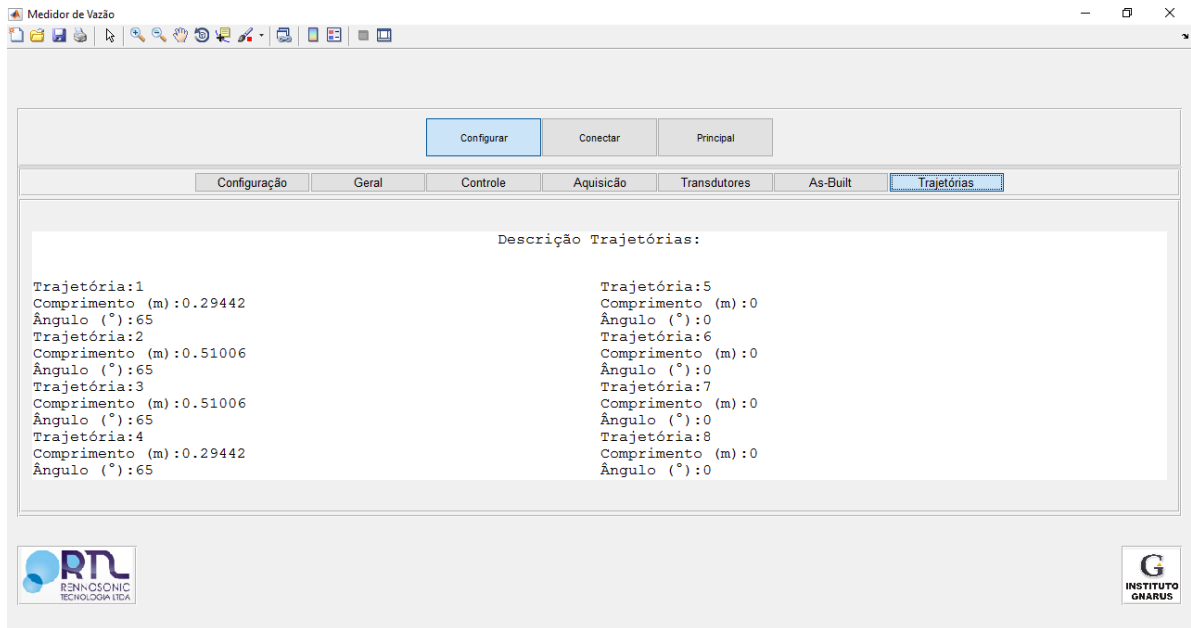


Figura 5.15. Tela Trajetórias

5.3.2. Telas relacionadas à parte Conectar

A Figura 5.16 apresenta a tela de conexão com a *hardware* do MVU. Como pode ser observado, as *flags* estão verdes, mostrando a conexão e comunicação com Controle de Periféricos e o SAQ. O botão Iniciar é responsável por iniciar o processo de comunicação.

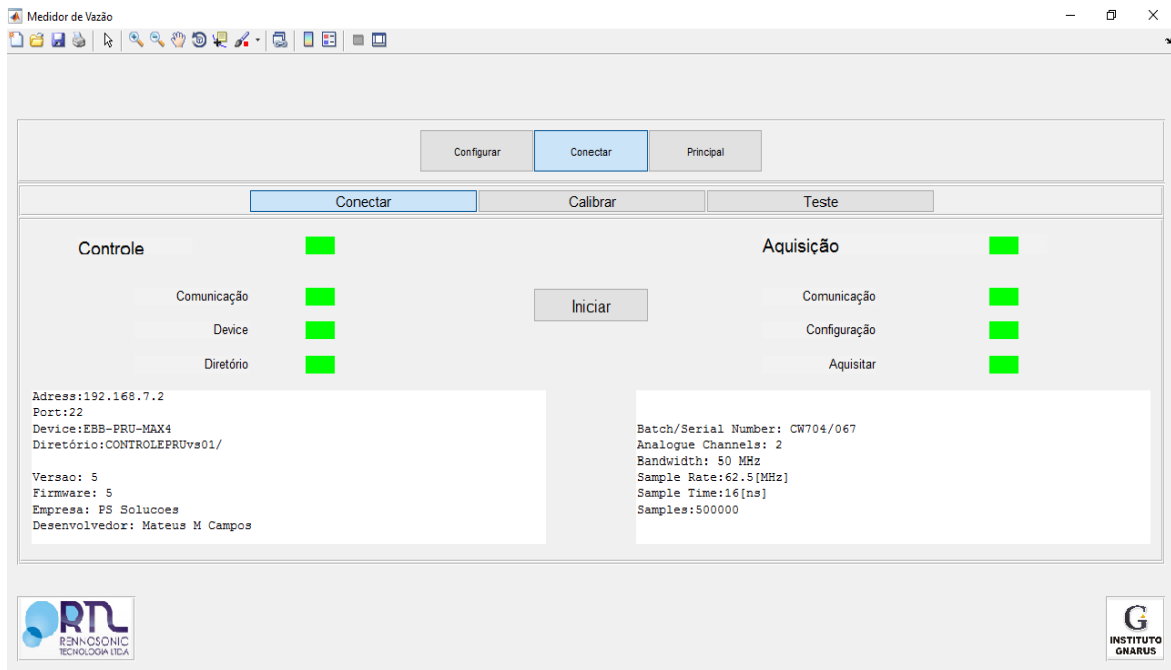


Figura 5.16. Tela Conectar

A tela Calibrar é a parte em que se realiza o ajuste de ganho dos sinais ultrassônicos, Figura 5.17. O processo é iniciado ao apertar o botão de ajuste e, ao fim do processo, é possível observar os sinais no gráfico ao lado.

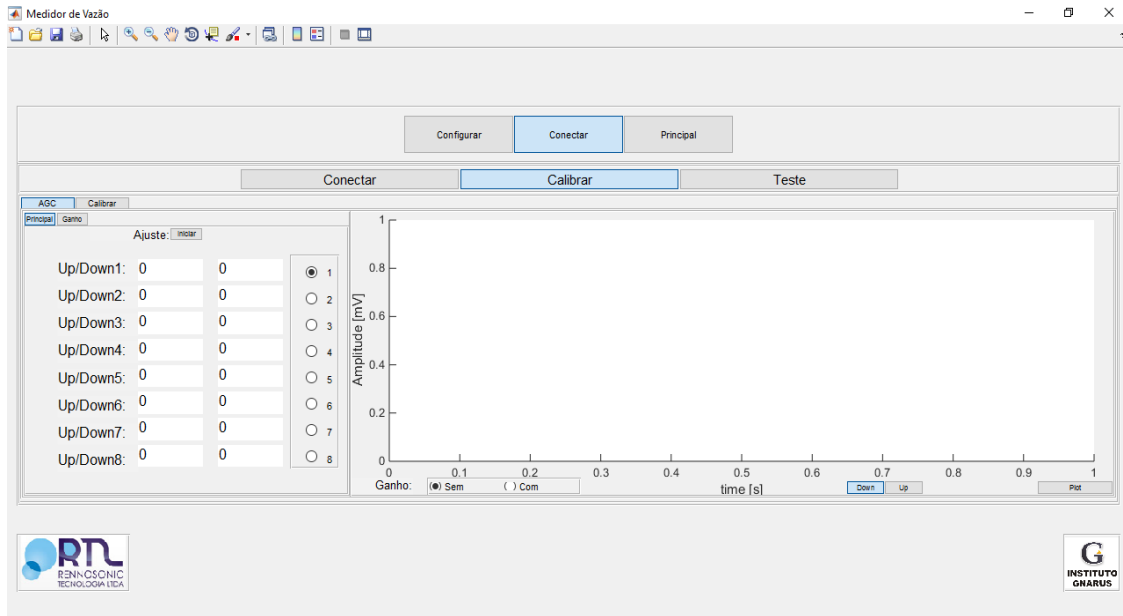


Figura 5.17. Tela Calibrar

A tela de ajuste de ganho possui uma parte que descreve os ganhos dos sinais ultrassônicos das trajetórias para auxiliar o usuário na modificação manual. Este processo é ilustrado na Figura 5.18, na qual se observa uma quantidade de 32 ganhos distintos para cada sinal ultrassônico (*up e down*).

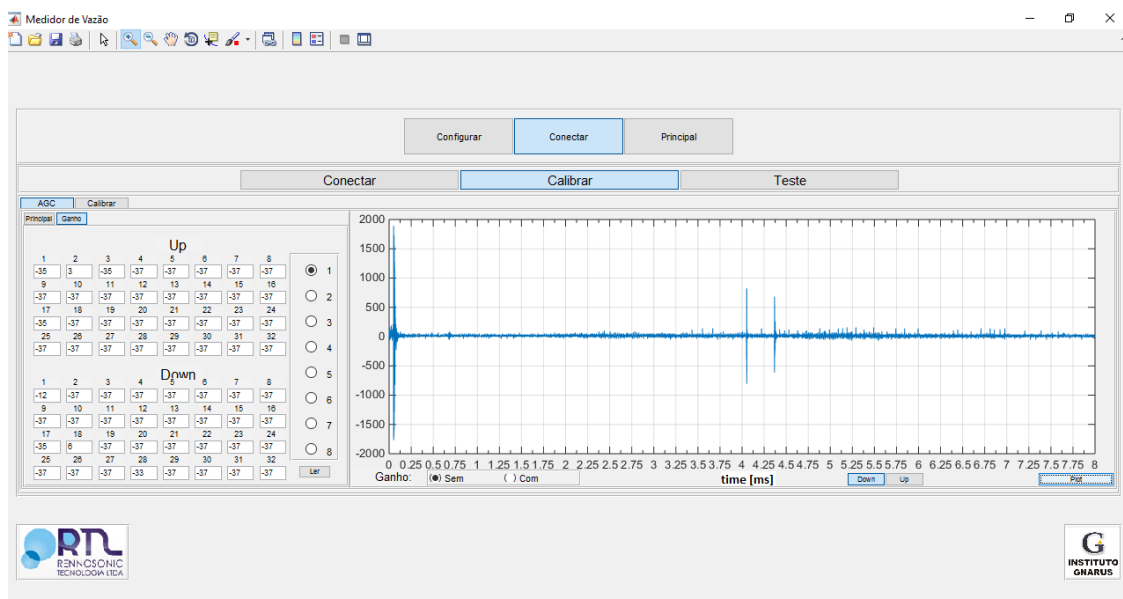


Figura 5.18. Sinal sem ganho

O sinal ultrassônico pode ser observado tanto sem a influência do ganho, Figura 5.18, quanto com a influência do ganho, Figura 5.19.

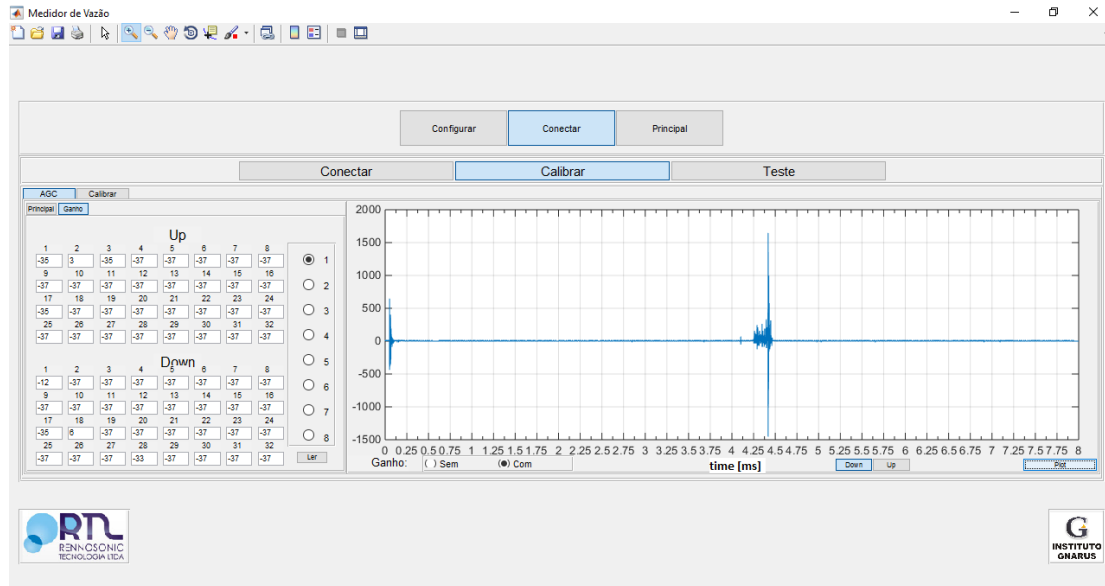


Figura 5.19. Sinal com ganho

5.3.3. Tela Principal

A tela principal apresenta as principais informações em relação ao processo de medição do MVU, conforme a Figura 5.20. Esta tela possui um botão de Iniciar responsável por acionar e interromper o processo de medição de vazão. Os dados observados ficam sendo atualizados frequentemente.

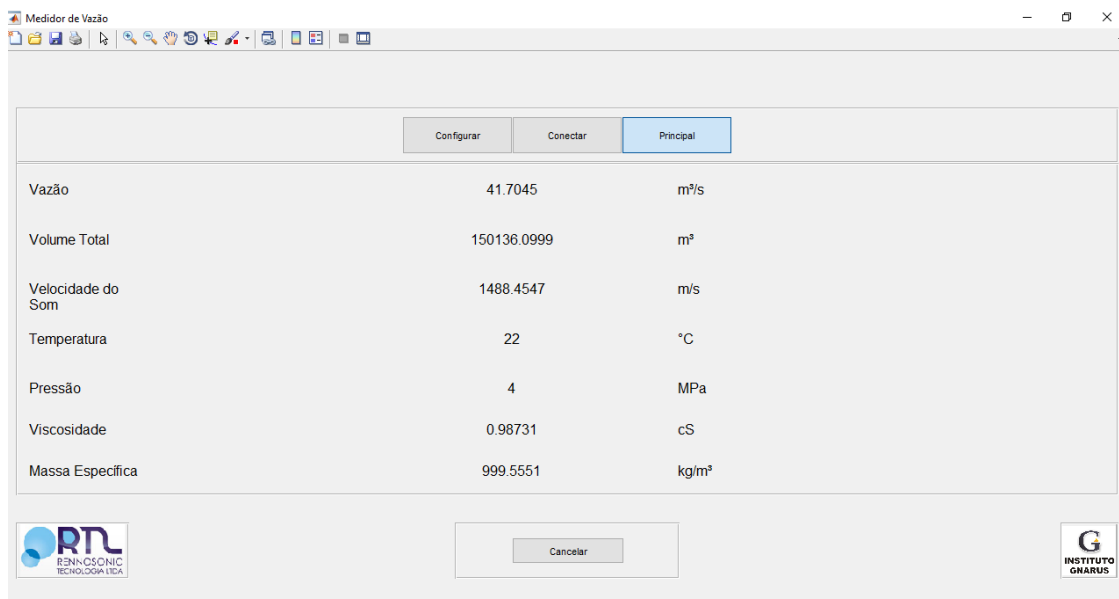


Figura 5.20. Tela Principal com dados

5.4. Comentários e discussões

Este capítulo apresentou o desenvolvimento do *software* do medidor de vazão ultrassônico, suas principais características e o modo de operação do sistema. Toda arquitetura de *software* foi desenvolvida para ser a interface com o usuário do MVU e sua estrutura pensada para ser utilizada com uma tela de toque.

Capítulo 6 – Resultados Experimentais

6.1. Introdução

O presente capítulo descreve os resultados obtidos de um experimento realizado em um laboratório especializado em calibração de medidores de vazão. Os dados aqui relatados foram adquiridos em experimentos feitos no Laboratório de Vazão Incontrol [56] certificado pelo Inmetro no Processo de Calibração de Medidores de Vazão [57].

Este capítulo é dividido em cinco partes: a primeira parte detalha o objetivo do experimento; a segunda apresenta os materiais e métodos relacionados ao experimento; a terceira, o desenvolvimento do processo de teste; a quarta relata os resultados dos experimentos; e, por último, a conclusão.

6.2. Objetivo

O objetivo do teste em laboratório é a aquisição de sinais de casos controlados de medição de vazão. Tais dados são importantes para analisar a estimativa da medição de vazão do protótipo em desenvolvimento em relação ao medido pelo laboratório pelo método Gravimétrico. Os principais objetivos são:

- Aquisição de sinais ultrassônicos de casos reais em ambientes controlados;
- Análise da Medição de Vazão pelo MVU;
- Teste de aquisição do protótipo;
- Medição de vazão baseada em casos reais e em ambiente controlado.

6.3. Materiais e Métodos

6.3.1. Laboratório Incontrol

Para testar o desenvolvimento do medidor de vazão, um laboratório de calibração de medidores de vazão foi contratado. A vantagem de utilizar um laboratório é a capacidade de obter diferentes velocidades de escoamento, um ambiente controlado com aferição de grandezas físicas como temperatura e pressão e, principalmente, obter confiança nos dados obtidos devido ao nível de incerteza na medição de vazão fornecido pelo laboratório. O laboratório contratado para tal função foi o laboratório de calibração

de medidores de vazão Incontrol [56]. A Figura 6.1 apresenta o local do laboratório Incontrol.

O laboratório de vazão Incontrol é hoje uma referência nacional. Ele atende à norma NBR/ISO/IEC 17025 de laboratórios, ISO 4185 - Laboratório de Vazão de Líquido pelo método Gravimétrico Estático [58] e cálculo de incerteza segundo a norma ISO 5168. A incerteza de calibração é de 0,05 % a 0,07 % (fator de abrangência $k=2$, nível de confiança = 95%). Todos os padrões primários utilizados são rastreados RBC (rede Brasileira de Calibração) e periodicamente calibrados sob as mais criteriosas condições de qualidade existente.

O Laboratório Incontrol está capacitado a calibrar medidores de diâmetros de 2,5 mm a 800 mm para vazões até 3.000 m³/h. O Laboratório Incontrol, seguindo a norma ISO 4185, contém basicamente um reservatório horizontal, um banco de bombas controladas por inversores, coletor, tubulações, válvulas, diversor e tanque de medição. Para as linhas maiores são instalados retificadores de fluxo para eliminar qualquer turbulência na linha onde é montado o medidor sob teste.



Figura 6.1. Instalação da Incontrol

O reservatório tem capacidade de 400.000 litros. Três instalações independentes, com tanques de 2 toneladas, 10 toneladas e 70 toneladas, permitem a calibração de vários medidores simultaneamente. Com isso, a capacidade do Laboratório de Vazão Incontrol chega a 400 medidores de vazão por mês.

Um dos diferenciais do Laboratório Incontrol é a implementação do projeto do diversor, elaborado e comprovado pelo NIST americano, com significativa melhoria na

incerteza da calibração quando comparado a outros laboratórios que trabalham com técnicas tradicionais de calibração.

Para assegurar a incerteza dentro dos padrões estabelecidos, a temperatura da água também é medida para entrar no cálculo de compensação da densidade, assim como são medidas a temperatura, a umidade relativa do ar e a pressão barométrica, para compensar o nível de evaporação do volume da água sob medição.

É utilizada comunicação digital com protocolo *Modbus* para a transmissão de dados dos sensores para um computador no qual são realizados os cálculos necessários, assim como para gerar os relatórios e certificados exigidos.

6.3.2. Método Gravimétrico de calibração

É um método de calibração em que o medidor a ser calibrado tem o seu valor de indicação confrontado com o valor em massa, determinado por uma balança de pesagem, em função do tempo. Este processo de calibração é baseado na norma ISO 4185 [58] e a Figura 6.2 ilustra o processo de medição. O princípio do método consiste em:

- 1 ° - determinar a massa inicial do tanque de pesagem;
- 2 ° - desviar o fluxo com o difusor para o tanque de pesagem;
- 3 ° - determinar a massa final contida no tanque.

A vazão de referência (Q_{ref}) pode ser determinada pelo quociente da massa coletada em função do tempo de aquisição. Este valor é então comparado com o valor indicado pelo medidor em calibração. Ou então podemos determinar o volume totalizado pelo medidor em calibração e confrontar com o valor do tanque de pesagem. A vazão de referência é dada por:

$$Q_{ref} = \frac{dm}{\rho \cdot dt} = \frac{(m_f - m_i)}{\rho \cdot (t_f - t_i)} \quad (Eq. 6.1)$$

em que:

- ρ - Massa específica;
- Q_{ref} - Vazão de referência ou padrão;
- dm - Variação da massa de líquido no tanque;
- dt - Variação de tempo decorrido;

- m_f - Massa final;
- m_i - Massa inicial;
- t_f - Tempo final;
- t_i - Tempo inicial.

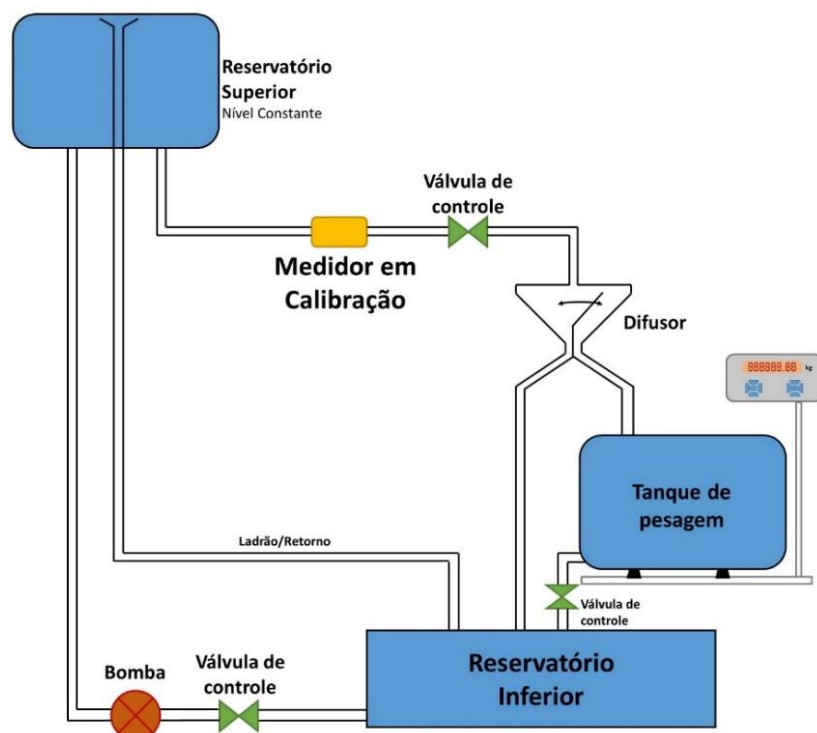


Figura 6.2. Método Gravimétrico de calibração - ISO 4185 [58]

6.3.3. Carretel desenvolvido para inserção na linha de medição de vazão

Para o teste no laboratório Incontrol, foi necessário desenvolver um carretel para ser acoplado à linha de fluxo, como mostrado na Figura 6.3. No total são oito transdutores distribuídos em quatro trajetórias acústicas paralelas, formando um plano acústico. O diâmetro interno do carretel é de $\phi = 0,60$ m. A Tabela 6.1 mostra o comprimento de cada trajetória acústica.

Tabela 6.1. Comprimento das trajetórias acústicas

Trajetoária	Comprimento (m)
1	0,332
2	0,623
3	0,623
4	0,332



Figura 6.3. Carretel de teste em laboratório

6.4. Desenvolvimento do ensaio

O ensaio foi dividido em quatro partes. A primeira parte tratou da instalação dos transdutores no carretel e a inserção do mesmo na linha de medição de vazão. A segunda parte para alinhar os transdutores das trajetórias acústicas. A terceira foi a medição sem fluxo e, a quarta e última, medições de quatro diferentes vazões.

6.4.1. Instalação do carretel na linha

O primeiro passo para começar a experiência em laboratório foi a instalação dos transdutores no carretel e a inserção deste na linha de medição do laboratório. Os oito transdutores formadores das quatro trajetórias acústicas foram instalados seguindo o procedimento adotado pela Rennosonic [61] e um alinhamento primário foi executado. A Figura 6.4 apresenta o carretel instalado na linha de medição do laboratório com os transdutores instalados no conduto. A Figura 6.5 ilustra o protótipo do MVU em teste.

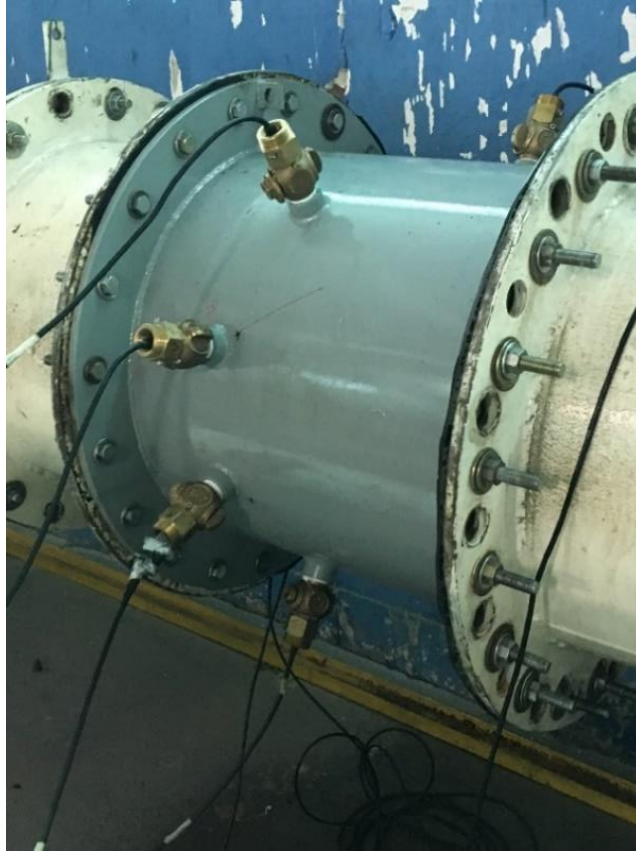


Figura 6.4. Carretel com os transdutores instalados

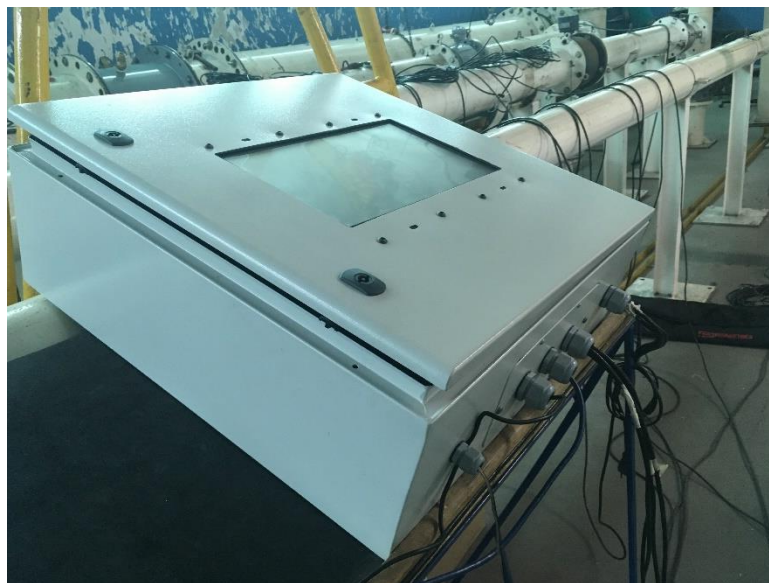


Figura 6.5. Protótipo em teste

6.4.2. Alinhamento dos transdutores

Uma vez que os transdutores estão instalados no carretel, o próximo passo é o alinhamento das trajetórias acústicas. Considera-se um bom alinhamento das trajetórias acústicas o máximo nível de amplitude de um sinal acústico recebido por um transdutor

sem que haja ação do AGC (*Automatic Gain Control*). Isso é possível de se obter quando as faces dos transdutores se encontram alinhadas. Um detalhe importante, após instalar os transdutores no carretel o único movimento que é possível é o movimento rotacional da válvula de segurança que prende o transdutor ao carretel, apresentada na Figura 6.6.



Figura 6.6. Válvula de instalação dos transdutores

6.4.3. Aquisição de sinais sem fluxo

O intuito de se realizar medições sem fluxo é a necessidade de se ter uma calibração de Zero (ou *Dry Calibration*) no sistema. Uma calibração de Zero consiste em determinar fatores de correções que eliminem (ou minimizem) erros na medição de vazão. No caso de uma verificação sem fluxo, as principais correções proporcionadas são as correções nos tempos de trânsito das trajetórias acústicas. O principal objetivo é encontrar um fator $t_{zero,i}$ que permita zerar a diferença de tempo entre $t_{up,i}$ e $t_{down,i}$, quando em condições $Q_V = 0$, para corrigir valores de *offset* de medição de fluxo. A equação é modificada para

$$Q_V = A \cdot \sum_{i=1}^4 w_i \cdot \frac{L_i}{2 \cdot \cos \varphi_i} \cdot \frac{t_{up,i} - t_{down,i} - t_{zero,i}}{t_{down,i} \cdot (t_{down,i} + (\Delta t_i - t_{zero,i}))} \quad (Eq. 6.2)$$

- Q_V - Vazão [m³/h]
- A - Área interna da seção transversal do conduto
- w_i - Coeficientes de ponderação da integração numérica
- $t_{up,i}$ - Tempo de trânsito *upstream*
- $t_{down,i}$ - Tempo de trânsito *downstream*
- $t_{zero,i}$ - Tempo de correção para fluxo zero
- i – Índice de trajetórias

sendo,

$$t_{zero,i} = \Delta t_{i,zero} = t_{up,i} - t_{down,i} \quad (Eq. 6.3)$$

O fator $t_{zero,i}$ é dado pela média das diferenças de N medições de $t_{up,i}$ e $t_{down,i}$,

$$t_{zero,i} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (t_{up,i} - t_{down,i})_n \quad (Eq. 6.4)$$

Para determinar $t_{zero,i}$, um total de 400 medições de $t_{up,i}$ e $t_{down,i}$ foram feitas duas vezes para cada trajetória, estimando o valor de correção $t_{zero,i}$.

6.4.4. Aquisição de sinais com fluxo e medição de vazão

Esta atividade foi dividida em duas etapas: uma etapa com medição de vazão com escoamento baixo, menor que 300 m³/h; e uma segunda medição com um valor intermediário de vazão em relação à capacidade do laboratório. Como explicado anteriormente, as medições pelo método Gravimétrico utilizam um sistema de comparação, que leva em conta a massa do volume de água despejada em um reservatório de pesagem em relação ao tempo, sendo a vazão obtida por um cálculo aritmético. Quatro medições de vazão foram realizadas, sendo duas com um escoamento baixo e duas com vazões intermediárias. Os resultados das medições de vazão do laboratório estão na Figura 6.7, assim como todas as condições do líquido no momento da medição.



PLANILHA DE CÁLCULOS (COMPARAÇÃO DIRETA ATRAVÉS DE TANQUE)

CERTIFICADO Nº :
 CLIENTE : Fundação de Apoio
 REFERÊNCIA :
 EQUIPAMENTO :
 MODELO MED. :
 MODELO CONV. :
 Nº DE SÉRIE MED. :
 Nº DE SÉRIE CONV. :
 TAG :
 Q min teste : 305 m³/h
 Q max teste : 10000,0 m³/h
 Valor da Saída : 3600,0 m³/h
 Fator declarado :
 Fator Admitido :

DATA : 04/04/17
 RESPONSÁVEL : Diogo
 TEMPERATURA : 23,025 °C
 TEMP. AMB. : 30,15 °C
 PRESSÃO ATM : 985 mbar
 U.R.A. : 52,9 %

Totalização do Padrão	Totalização do Medidor em teste	Tempo	Totalização do Medidor em teste	Vazão do Padrão	Vazão do Medidor em teste	Frequência do Medidor em teste	Erro Leitura	Erro Fundo de Escala	Ref.
Litros	Pulsos	seg.	Litros	m³/h	m³/h	Hz	%	%	%
12127,8		150,964	0,0	289,208	0,000	0,00	-100,0000	-2,98306	100
11976,7		151,602	0,0	284,402	0,000	0,00	-100,0000	-2,93349	100
0,0			0,0	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	100
46478,7		100,973	0,0	1657,110	0,000	0,00	-100,0000	-17,09242	75
45453,9		100,856	0,0	1622,454	0,000	0,00	-100,0000	-16,73496	75
0,0			0,0	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	75

Temperatura da água	Temperatura ambiente	Pressão ATM	U.R.A	Massa indicada	Massa Coletada	Densidade do ar	Densidade da água	incerteza
°C	°C	mbar	%	Kg	Kg	g/cm³	g/cm³	%
23,1	30,1	985	53,6	12084,0	12097,6	0,00112	0,99751	0,1964
22,9	30,1	985	52,9	11934,0	11947,4	0,00112	0,99756	0,1988
					0,0	0,00000	0,99985	0,0700
23,1	30,2	985	52,3	46311,0	46363,1	0,00112	0,99751	0,0700
23,0	30,2	985	52,8	45291,0	45342,0	0,00112	0,99754	0,0700

FLB005_REV.01_10/12/09-PS.1/2

Figura 6.7. Resultados de medição pelo método Gravimétrico

6.5. Testes e resultados

6.5.1. Sinais ultrassônicos

As Figuras 6.8 e 6.9 apresentam uma amostra dos sinais ultrassônicos recebidos pelos transdutores das trajetórias acústicas adquiridos durante a medição de vazão. Os quadros mais à esquerda representam as ondas ultrassônicas sendo emitidas pelos transdutores *downstream* (cor azul) e sendo recebidas pelos transdutores *upstream* (cor laranja), enquanto os quadros mais à direita representam o sentido contrário de propagação de ondas no meio, de *upstream* (cor laranja) transmitindo e *downstream* (cor azul) recebendo. É possível observar que as ondas ultrassônicas perdem amplitude devido à propagação no meio. As Figuras 6.10 e 6.11 mostram os formatos de uma amostra dos sinais ultrassônicos recebidos pelos transdutores das trajetórias acústicas.

Os sinais observados são utilizados para estimar os tempos de trânsitos das trajetórias acústicas. Como dito no capítulo 5, o método utilizado para estimar ToF é a Correlação Cruzada. Como proposto, os sinais ultrassônicos se correlacionam com um sinal de referência previamente estabelecido e baseado nos sinais ultrassônicos dos próprios transdutores utilizados no sistema de medição. A Figura 6.12 apresenta o sinal ultrassônico de referência.

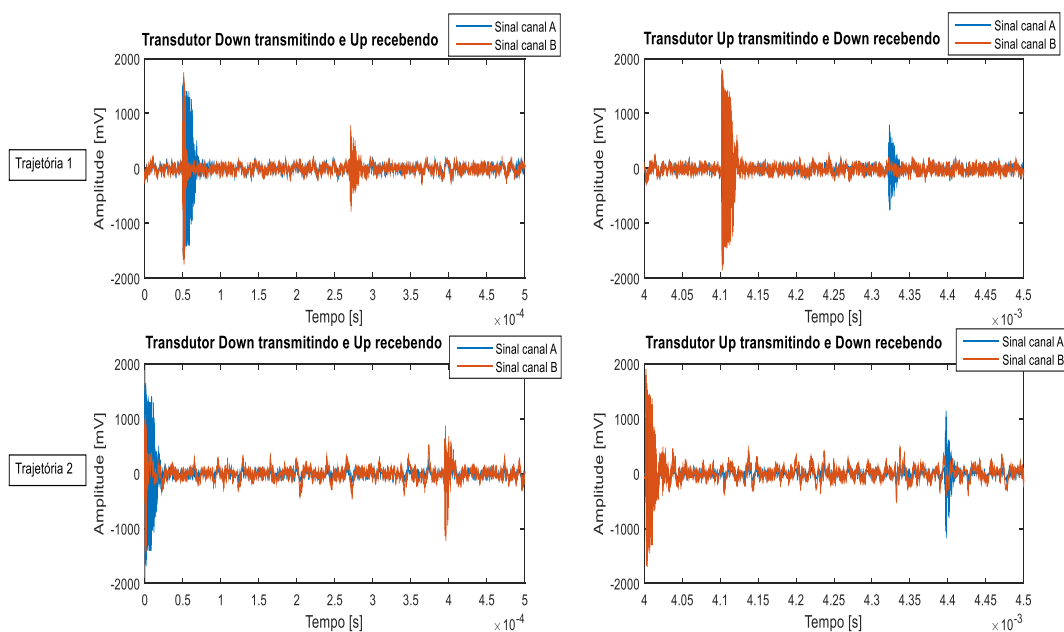


Figura 6.8. Sinais ultrassônicos das trajetórias 1 e 2

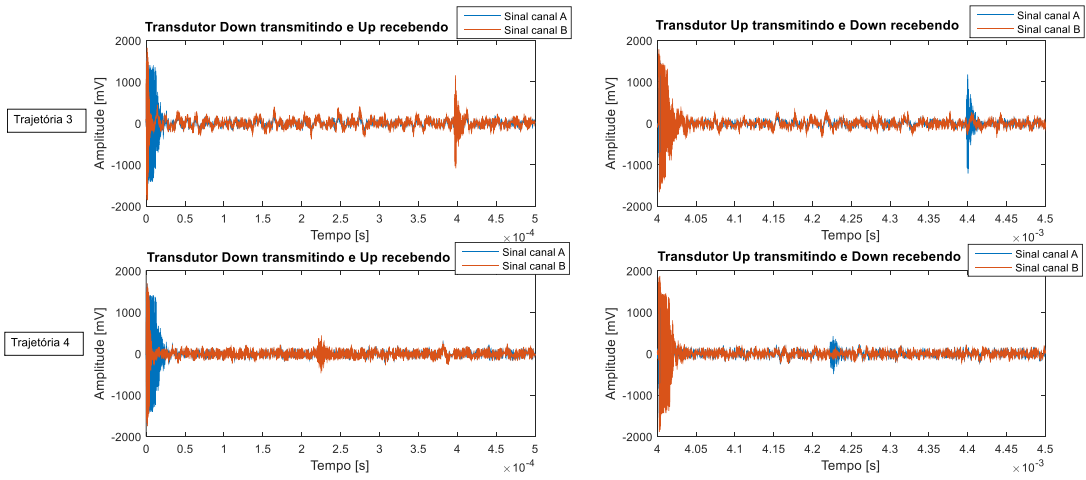


Figura 6.9. Sinais ultrassônicos das trajetórias 3 e 4

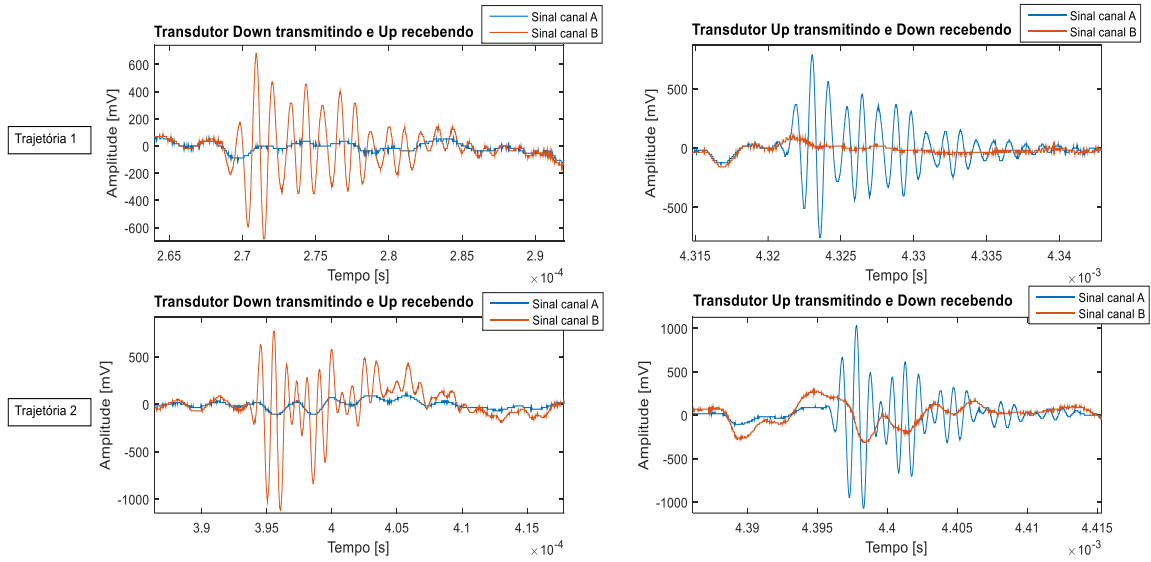


Figura 6.10. Sinais ultrassônicos de recepção das trajetórias 1 e 2 ampliadas

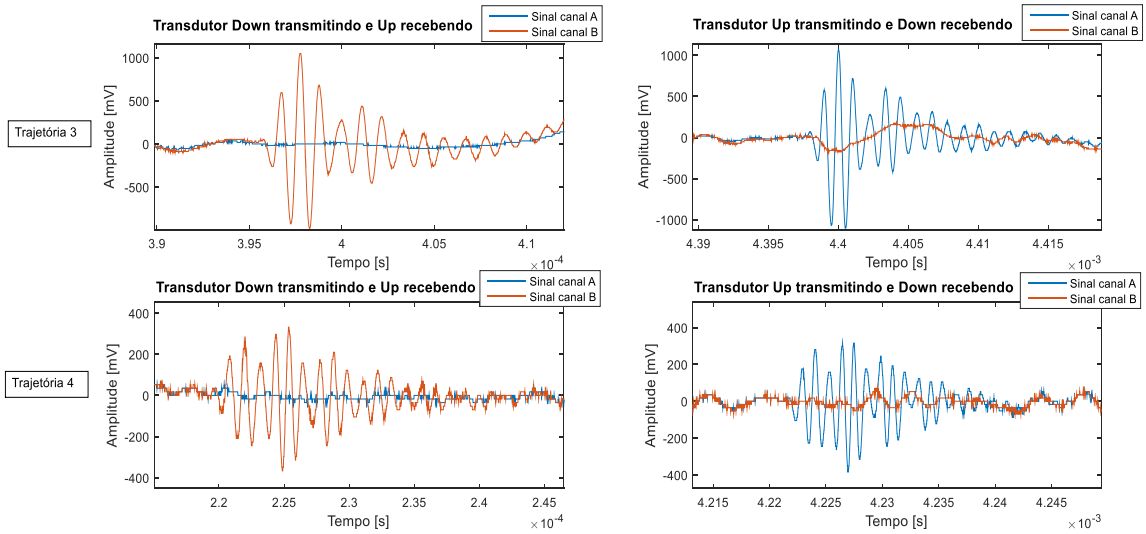


Figura 6.11. Sinais ultrassônicos de recepção das trajetórias 3 e 4 ampliadas

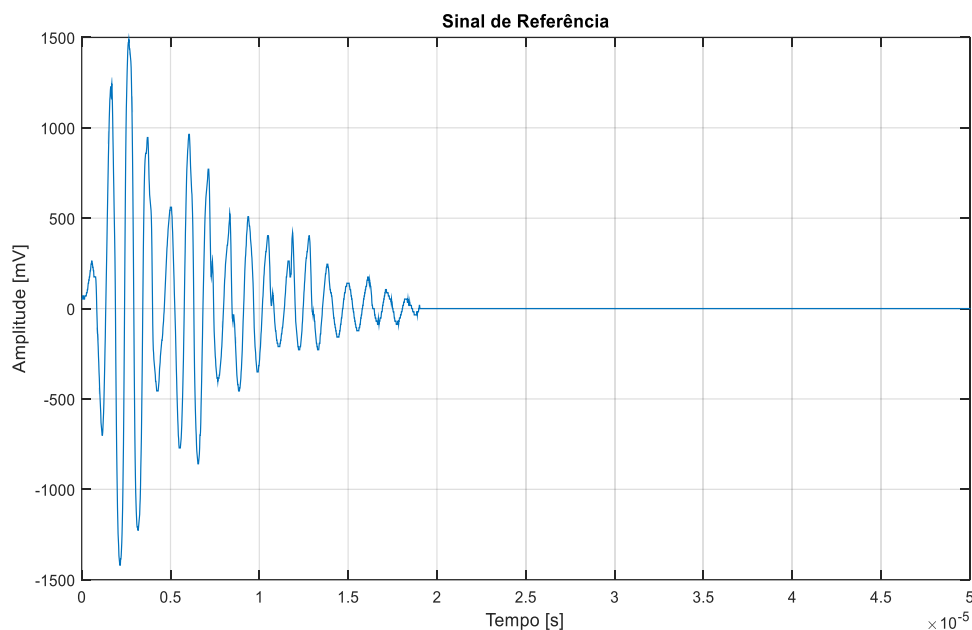
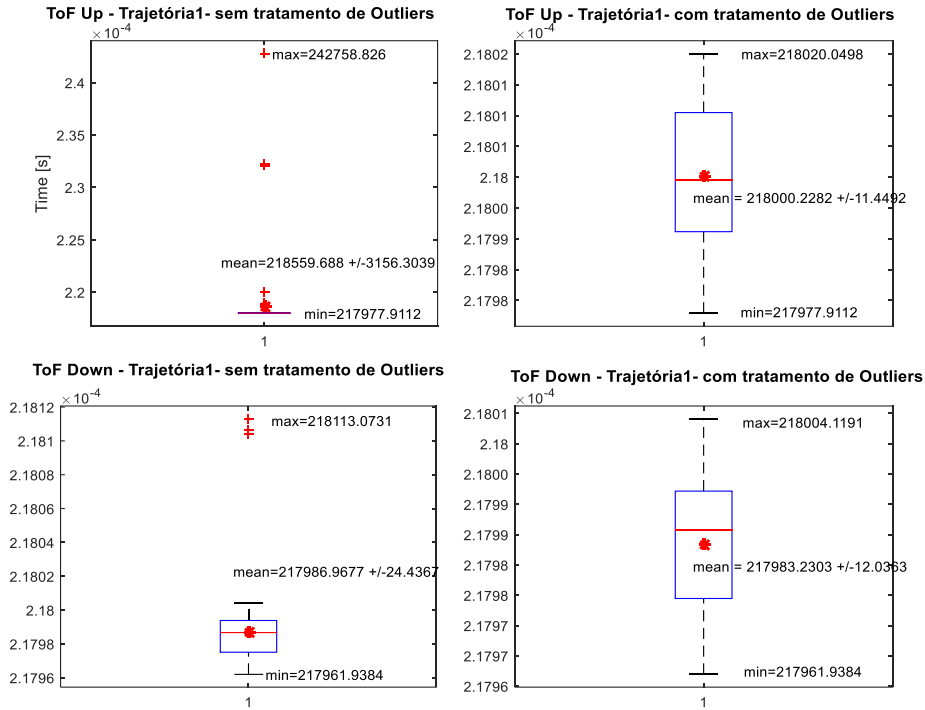


Figura 6.12. Sinal ultrassônico de referência para a estimativa de ToF

6.5.2. Resultado do ajuste de Zero

Esta seção mostra a obtenção dos valores de $t_{zero,i}$ para cada trajetória acústica. Como descrito anteriormente, foram feitas 400 medições $t_{up,i}$ e $t_{down,i}$ duas vezes. Os dados estão representados nas Figuras 6.13 a 6.20. As figuras ilustram os dados sem tratamento de *outliers*, à esquerda, e com tratamento de *outliers*, à direita. Os dados foram representados por gráficos *boxplot* e, nos gráficos, são indicados quatro parâmetros importantes relacionados à medição de tempo de trânsito: *valor mínimo*, *valor máximo*, *média* e *desvio padrão*. A explicação do *boxplot* e dos quatro parâmetros podem ser encontrados em *Montgomery* [54]. A média (\bar{x}) e o desvio padrão (s) são representados no gráfico pelo asterisco (*) vermelho e seus valores numéricos são mostrados nos gráficos da seguinte forma: $\bar{x} \pm s$. Com a análise do *boxplot* é possível saber a distribuição das amostras e possíveis *outliers* nas medições.



* Os gráficos apresentados em todo documento apresentam o símbolo ponto (.) como indicativo das casas decimais

Figura 6.13. Primeira medição de tempo de trânsito da trajetória 1 - sem e com tratamento de outliers

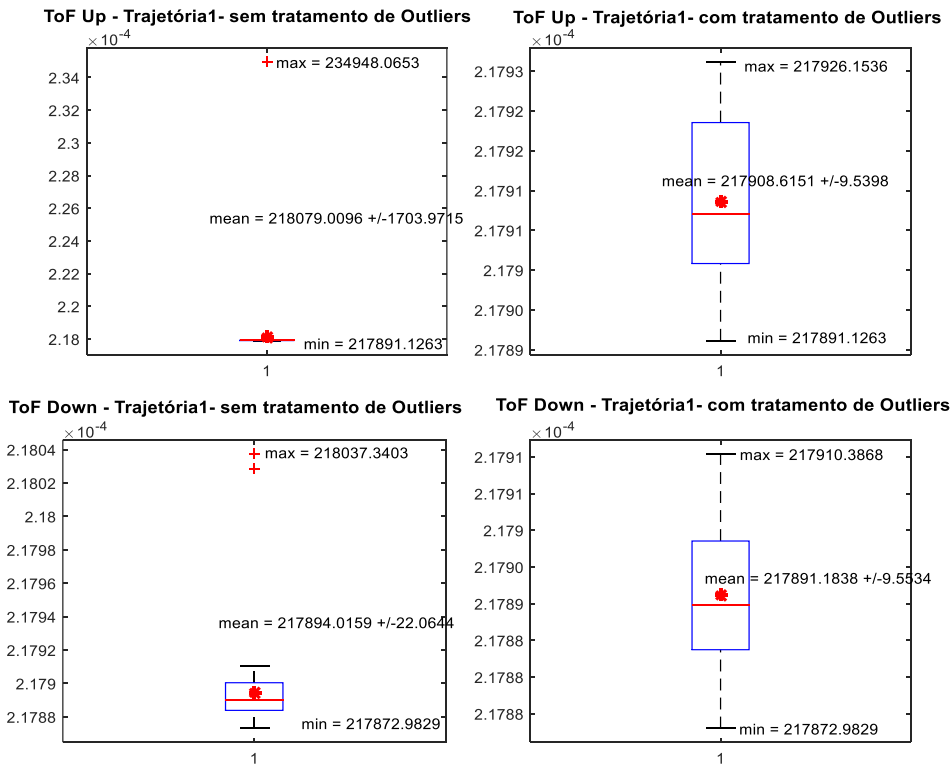


Figura 6.14. Segunda medição de tempo de trânsito da trajetória 1 - sem e com tratamento de outliers

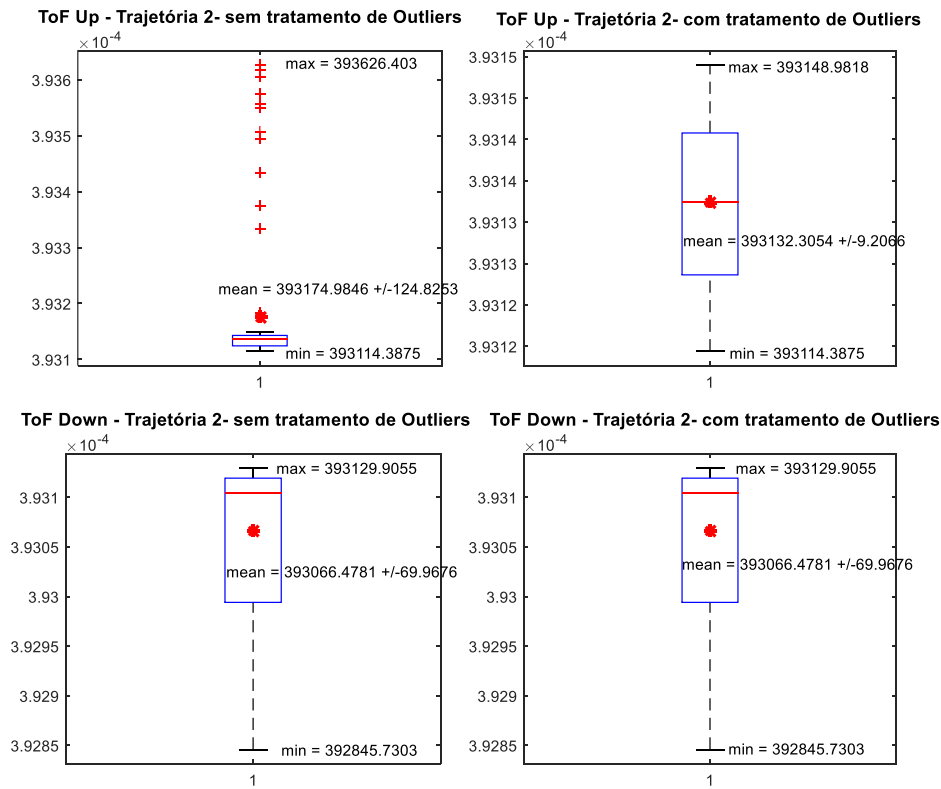


Figura 6.15. Primeira medição de tempo de trânsito da trajetória 2 - sem e com tratamento de outliers

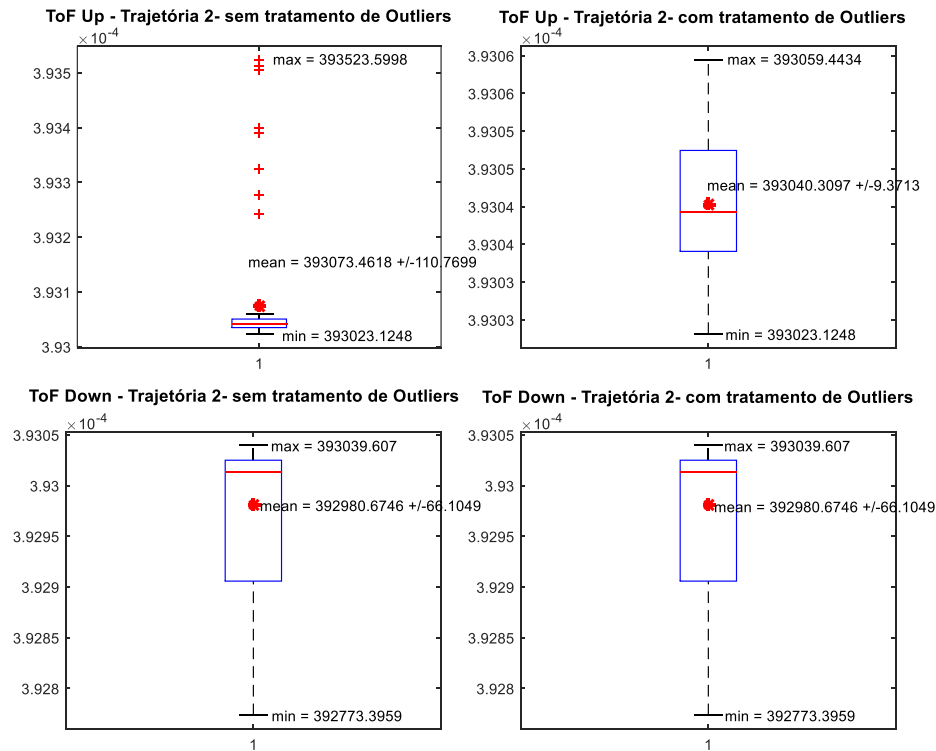


Figura 6.16. Segunda medição de tempo de trânsito da trajetória 2 - sem e com tratamento de outliers

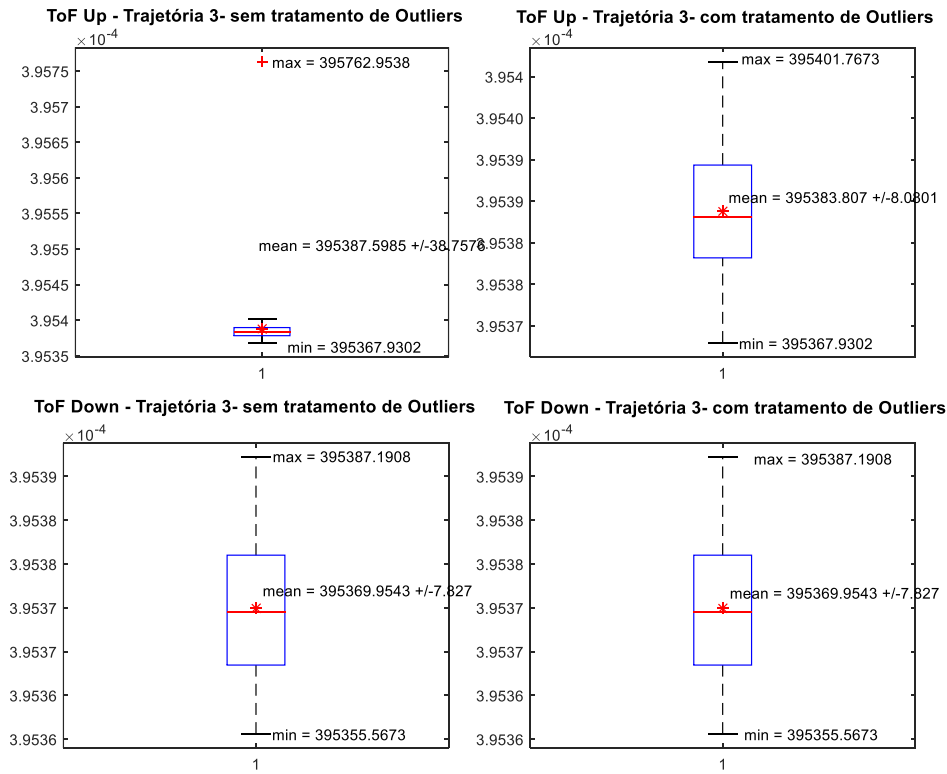


Figura 6.17. Primeira medição de tempo de trânsito da trajetória 3 - sem e com tratamento de outliers

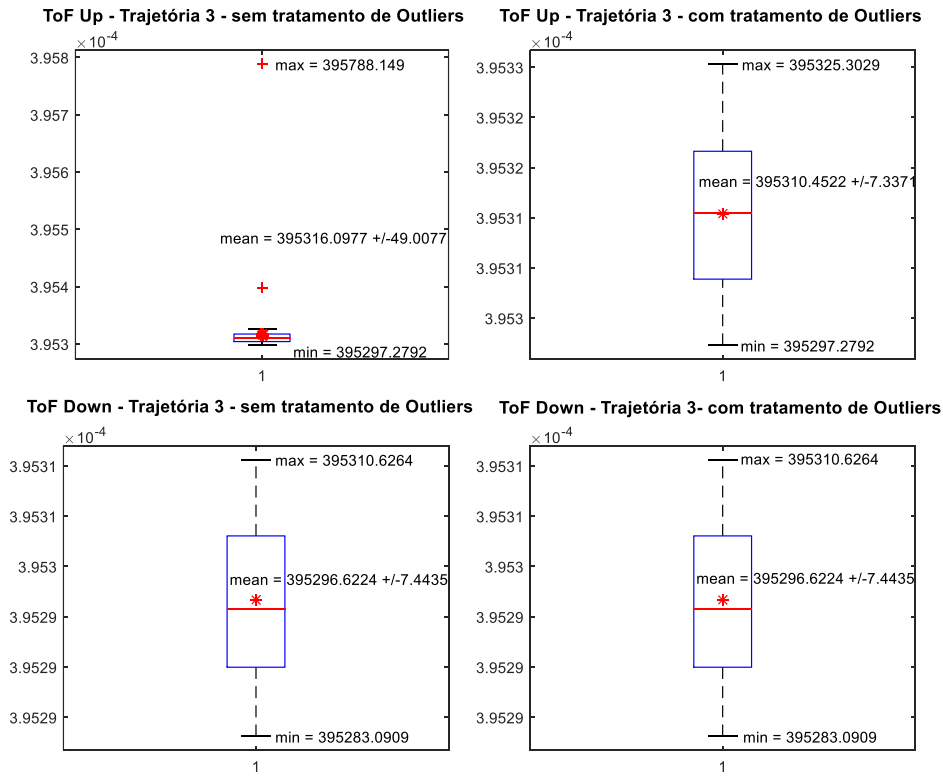


Figura 6.18. Segunda medição de tempo de trânsito da trajetória 3 - sem e com tratamento de outliers

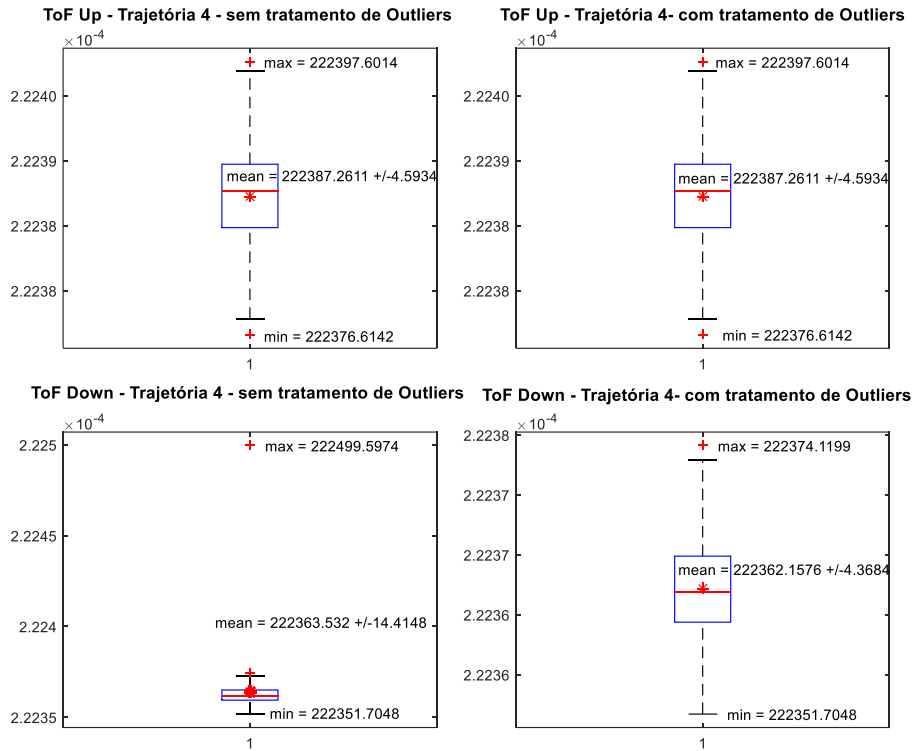


Figura 6.19. Primeira medição de tempo de trânsito da trajetória 4 - sem e com tratamento de outliers

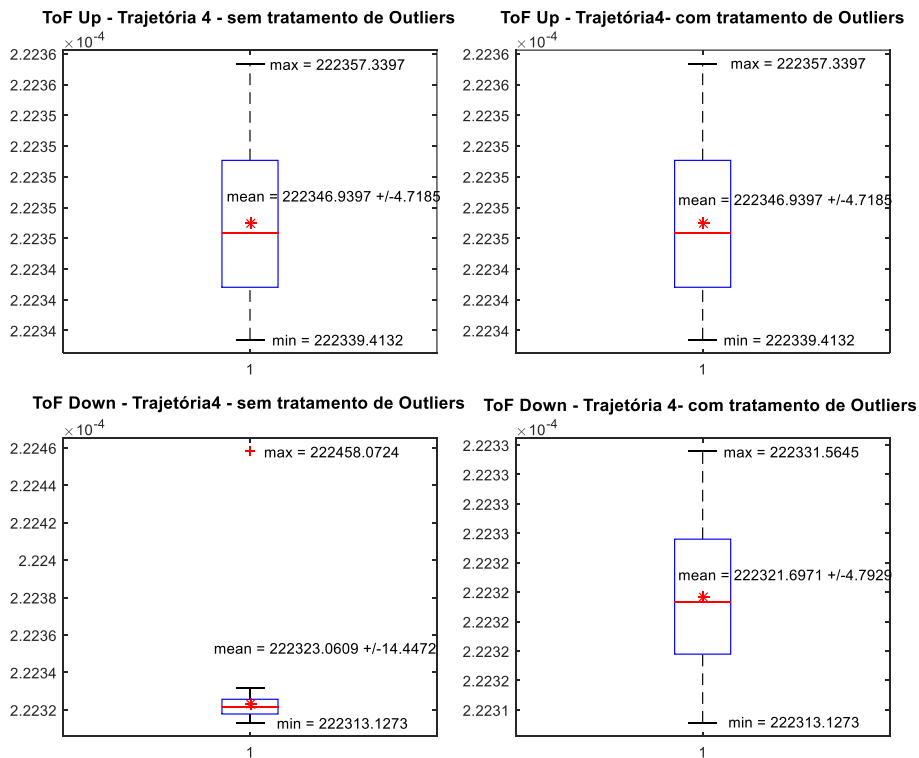


Figura 6.20. Segunda medição de tempo de trânsito da trajetória 4 - sem e com tratamento de outliers

As Tabelas 6.2 a 6.5 mostram os valores de correções de Zero ($t_{zero,i}$) calculados para cada trajetória. Conforme citado anteriormente, duas medições com 400 amostras de tempo de trânsito foram feitas para escoamento zero e uma média destes valores foi feita. A Tabela 6.6 sintetiza os valores de correções.

Tabela 6.2. Valores de correção de tempo de trânsito trajetória 1

Amostra	N	$t_{up,i}$ (ns)	$t_{down,i}$ (ns)	$t_{zero,i}$ (ns)
1	400	218000,2282	217983,2303	16,9979
2	400	217908,6151	217891,1838	17,4313
			Média	17,2146

Tabela 6.3. Valores de correção de tempo de trânsito trajetória 2

Amostra	N	$t_{up,i}$ (ns)	$t_{down,i}$ (ns)	$t_{zero,i}$ (ns)
1	400	393132,3054	393066,4781	65,8273
2	400	393040,3097	392980,6746	59,6351
			Média	62,7312

Tabela 6.4. Valores de correção de tempo de trânsito trajetória 3

Amostra	N	$t_{up,i}$ (ns)	$t_{down,i}$ (ns)	$t_{zero,i}$ (ns)
1	400	395383,8070	395369,9540	13,8530
2	400	395310,4520	395296,0910	14,3610
			Média	14,1070

Tabela 6.5. Valores de correção de tempo de trânsito trajetória 4

Amostra	N	$t_{up,i}$ (ns)	$t_{down,i}$ (ns)	$t_{zero,i}$ (ns)
1	400	222387,2611	222362,1576	25,1035
2	400	222346,9397	222321,6971	25,2426
			Média	25,1730

Tabela 6.6. Correções de Zero para trajetórias

Trajectoria (i)	$t_{zero,i}$ (ns)
1	17,2146
2	62,7312
3	14,1070
4	25,1730

6.5.3. Resultado da medição de vazão

Como apresentado na Figura 6.7, foram realizadas quatro medições com base no método Gravimétrico do laboratório. Os valores de laboratório foram comparados aos medidos pelo protótipo do projeto. As seções seguintes apresentam os resultados de medição e os valores obtidos pelo laboratório.

6.5.3.1. Medição 1

A primeira vazão medida pelo processo Gravimétrico teve o valor médio estimado em 289,208 m³/h em um período de medição de 150,964 s. Os resultados obtidos pelo protótipo foram dados por uma média de 50 pontos de estimativa de escoamento (pontos medidos no período do processo de medição do laboratório) e obtiveram um valor médio bruto de 307,647 m³/h e um desvio padrão de 271,442 m³/h. A Figura 6.21, parte superior, mostra os 50 pontos de medição estimados, pontos em azul; a linha vermelha representa a média do laboratório; e a parte inferior mostra a síntese dos dados em uma representação *boxplot*. Como observado no *boxplot*, a medição de vazão apresenta alguns valores

discrepantes (*outliers*) em relação ao conjunto de amostras, fazendo com que a média de todas as amostras tenda a um valor fora do corpo do *boxplot*, onde se concentra a maioria dos dados. Além disso, percebe-se, pelo desvio padrão, uma grande dispersão dos dados.

Após um tratamento de *outliers*, observa-se na Figura 6.22, parte inferior, que os valores de *outliers* foram eliminados e uma nova média e desvio padrão foram calculados, resultando nos valores de $239,735 \pm 11,300 \text{ m}^3/\text{h}$. Os dados de medição de vazão pontuais na Figura 6.22, parte superior, mostram suas amplitudes e sua distância em referência ao valor médio da medição do laboratório.

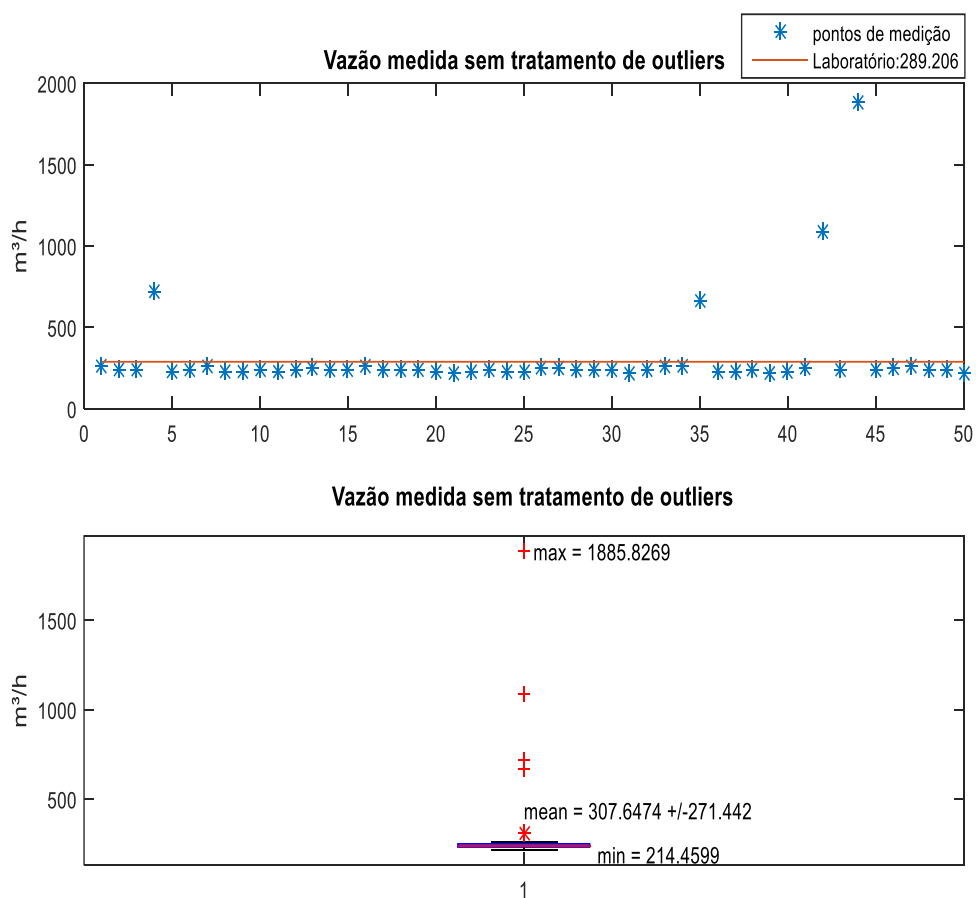


Figura 6.21. Primeira medição de vazão sem tratamento de outliers

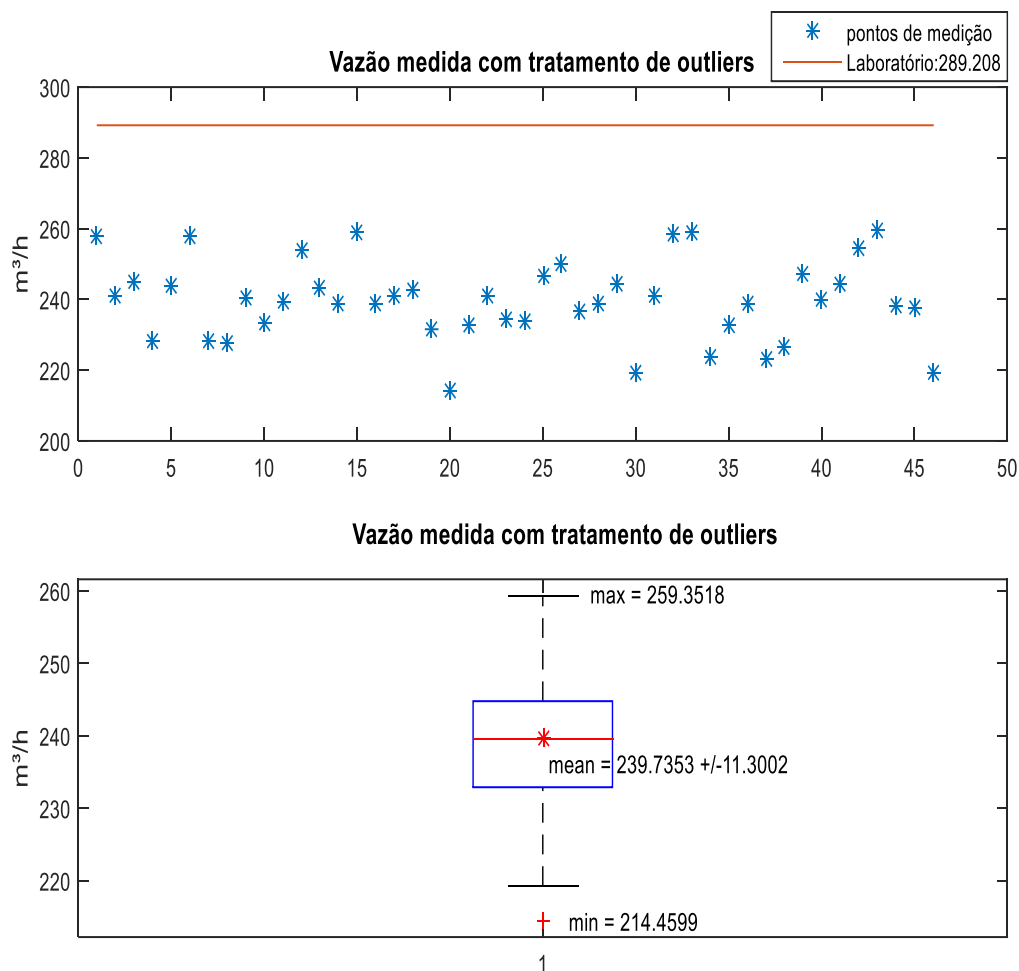


Figura 6.22. Primeira medição de vazão com tratamento de outliers

6.5.3.2. Medição 2

A segunda vazão medida pelo processo Gravimétrico foi um valor próximo ao da primeira medição e teve o valor médio estimado em 284,402 m³/h em um período de medição de 151,602 s. Os resultados obtidos pelo protótipo foram dados por uma média de 50 pontos de estimativa de vazão e obteve-se um valor médio bruto de 307,9087 m³/h e um desvio padrão de 263,475 m³/h. A Figura 6.23, superior, apresenta os 50 pontos de medição estimados durante o mesmo período de medição do laboratório, pontos em azul; e a linha vermelha representa a média do laboratório. A Figura 6.23, inferior, apresenta a síntese dos dados em uma representação *boxplot*. Como observado no *boxplot*, há presença de *outliers* que fazem a média dos dados de vazão se deslocar para um valor incorreto.

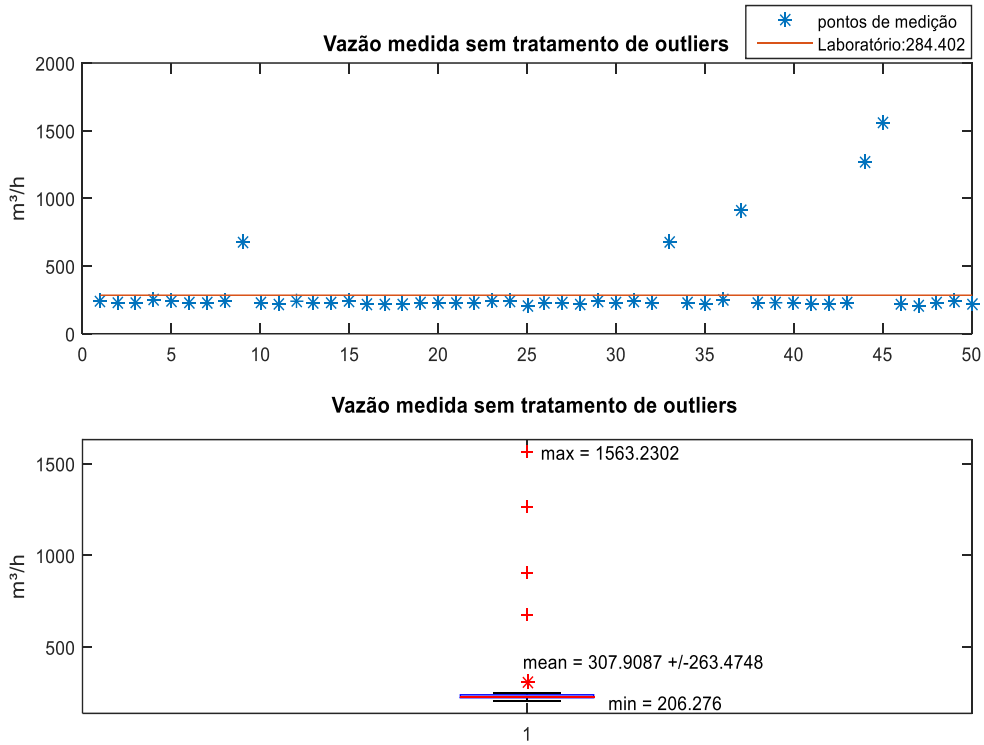


Figura 6.23. Segunda medição de vazão sem tratamento de outliers

Com o tratamento de *outliers*, observa-se na Figura 6.24 a eliminação dos *outliers* e novos valores de média e desvio padrão foram estimados, $229,1647 \pm 9,4805$ m³/h.

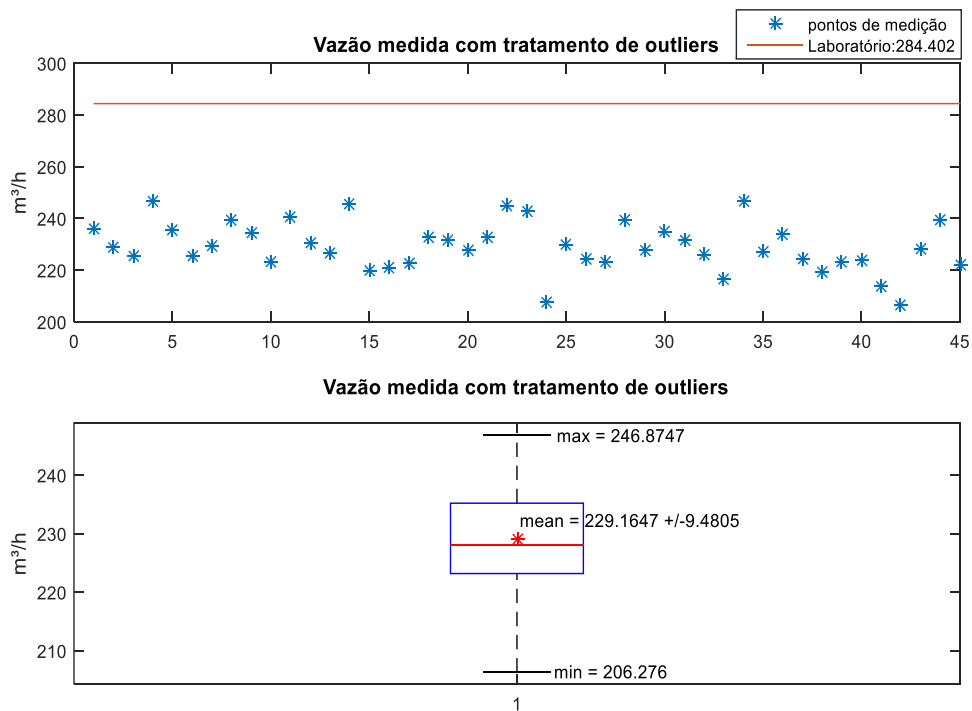


Figura 6.24. Segunda medição de vazão com tratamento de outliers

6.5.3.3. Medição 3

A terceira vazão medida pelo processo Gravimétrico foi um valor intermediário da capacidade do laboratório e teve o valor médio estimado em 1657,110 m³/h em um período de medição de 100,973 s. Os resultados obtidos pelo protótipo foram dados por uma média de 50 pontos de estimativa de vazão durante o mesmo período de medição do laboratório e se obteve um valor médio bruto de 1660,5998 m³/h e um desvio padrão de 92,6908 m³/h. A Figura 6.25, parte superior, apresenta os 50 pontos de medição estimados, pontos em azul; e a linha vermelha representa a média do laboratório. A Figura 6.25 mostra a síntese dos dados em uma representação *boxplot*.

Com o tratamento de *outliers*, novos valores de média e desvio padrão foram estimados, 1660,5998 ± 26,4889 m³/h. Nota-se na Figura 6.26 em relação à Figura 6.25 uma mudança significativa apenas no valor de desvio padrão, enquanto a média não sofre uma influência significativa ao se eliminar os *outliers*.

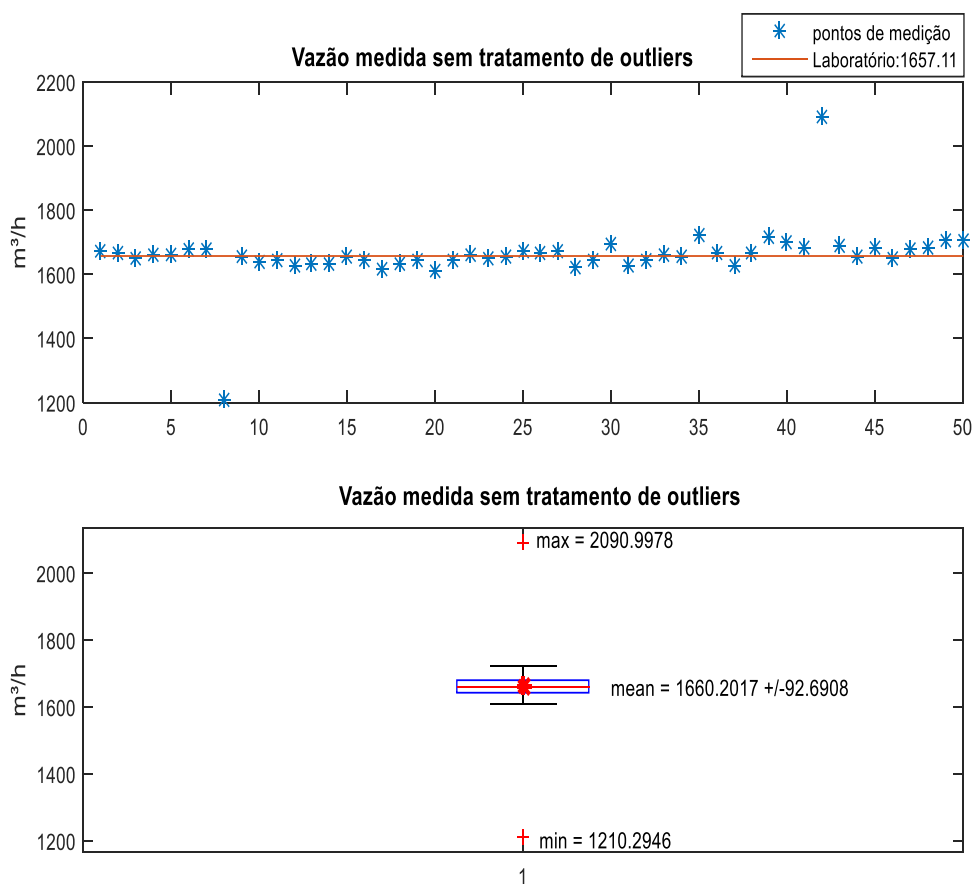


Figura 6.25. Terceira medição de vazão sem tratamento de outliers

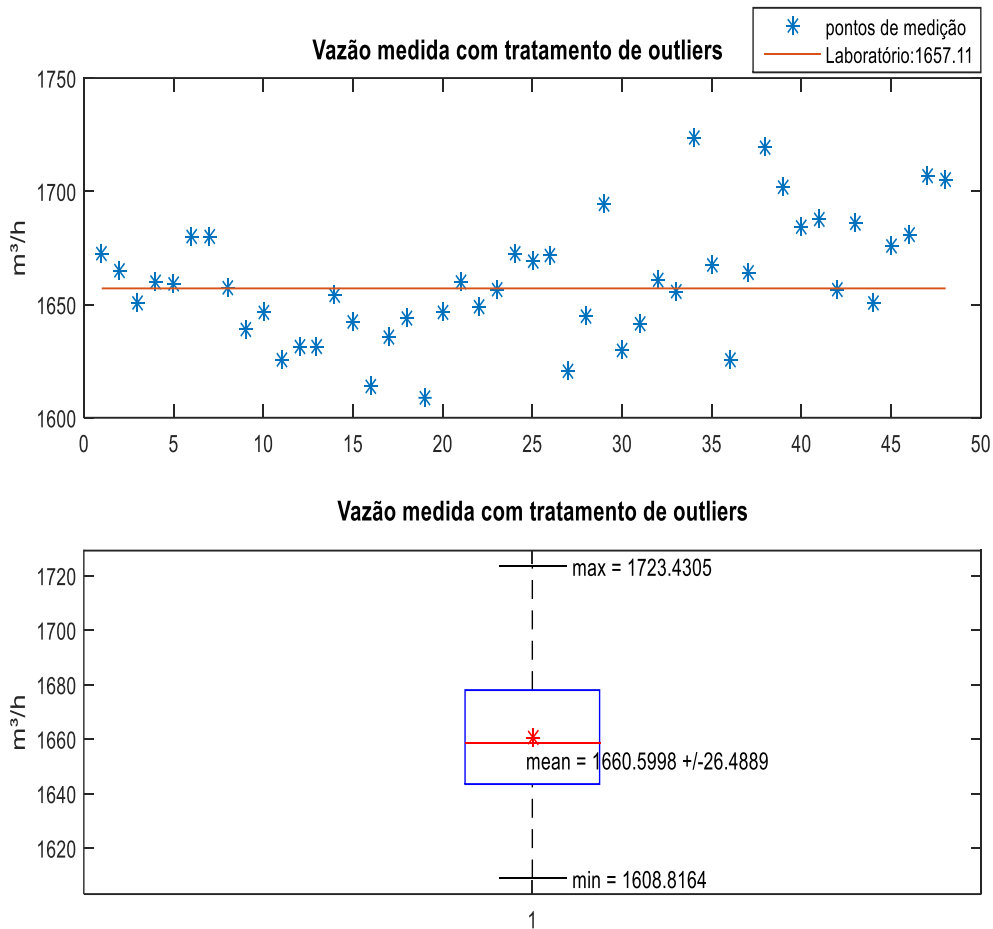


Figura 6.26. Terceira medição de vazão com tratamento de outliers

6.5.3.4. Medição 4

A quarta vazão medida pelo processo Gravimétrico foi um valor intermediário da capacidade do laboratório próxima ao valor de medição anterior e teve o valor médio estimado em 1622,454 m³/h em um período de medição de 100,856 s. Os resultados obtidos pelo protótipo foram dados por uma média de 50 pontos de estimativa de vazão e se obteve o valor de 1581,3937 ± 212,8759 m³/h. Como observado na Figura 6.27 no *boxplot*, houve valores discrepantes de vazão, fazendo a média se deslocar e obtendo um valor alto de desvio padrão.

Com o tratamento de *outliers*, a nova média e desvio padrão foram estimados para 1622,8444 ± 42,4955 m³/h. A Figura 6.28 apresenta a eliminação dos *outliers*. A principal análise referente a esta quarta medição de vazão é que a média foi muito influenciada com a presença dos *outliers*. Porém, ao se eliminar estes pontos discrepantes, a média se aproxima do valor medido pelo laboratório.

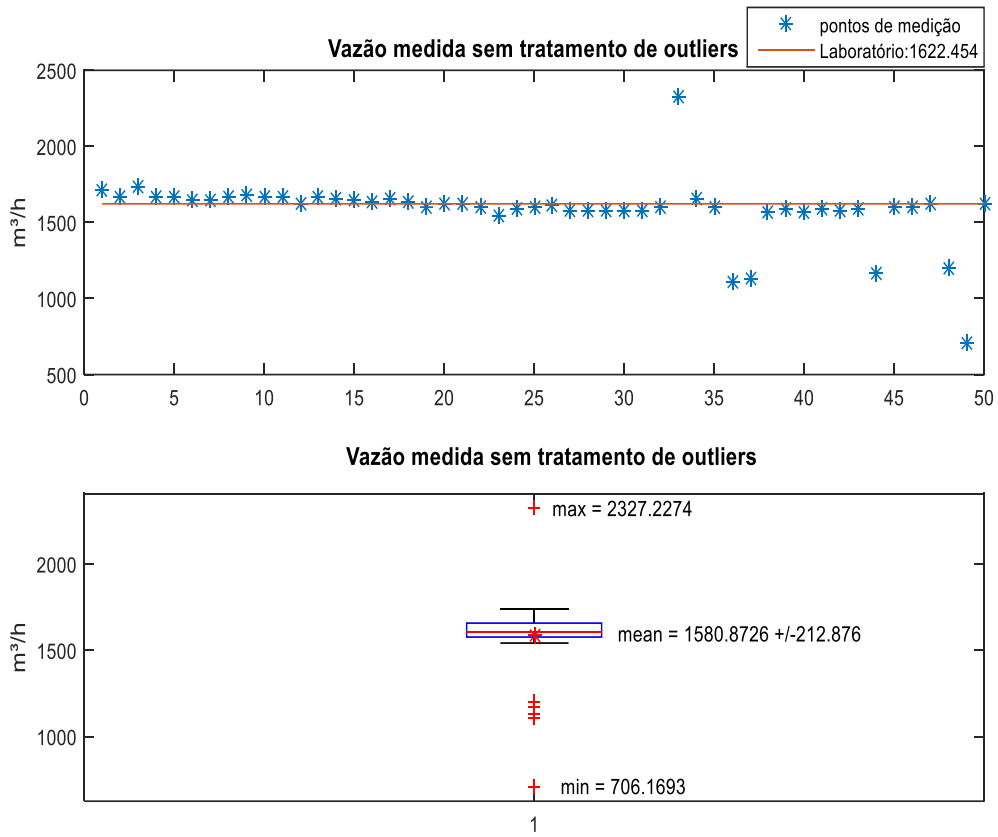


Figura 6.27. Quarta medição de vazão sem tratamento de outliers

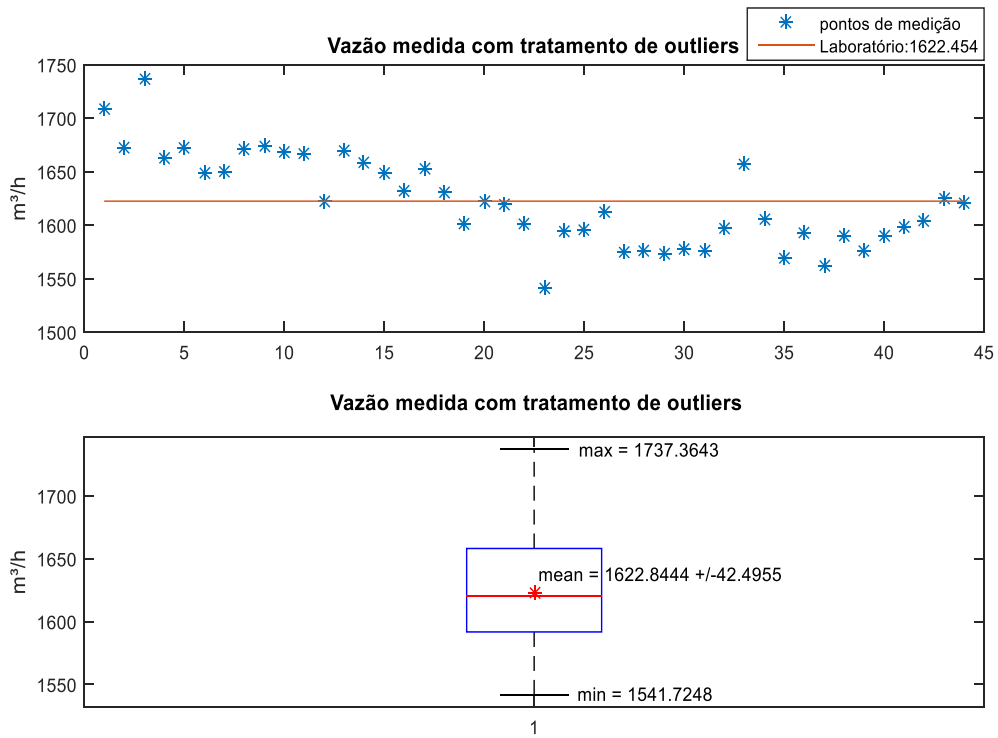


Figura 6.28. Quarta medição de vazão com tratamento de outliers

6.6. Análise de dados

6.6.1. Análises das medições de vazão

Para ter uma estimativa da diferença entre o valor medido pelo o laboratório e o valor medido pelo protótipo, uma análise pelo erro relativo foi feita. A fórmula é dada por

$$\varepsilon(\%) = 100 \cdot \frac{(Q_{lab} - Q_v)}{Q_{lab}}, \quad (Eq. 6.5)$$

onde, Q_{lab} é o valor de vazão medido pelo método Gravimétrico; Q_v é o valor de vazão medido pelo protótipo; e $\varepsilon(\%)$ é o erro relativo entre as medições. A Tabela 6.7 sintetiza os dados analisados.

Os resultados apontam um erro relativo muito alto para pequenas vazões, medição 1 e 2, ao passo que para os valores intermediários, medições 3 e 4, os valores ficaram menores que 0,50 %.

Tabela 6.7. Erros relativos entre medições do laboratório e do protótipo

Medição	Vazão [m³/h]		Erro relativo [%]
	Média laboratorial	Média do protótipo	
	Q_{lab}	Q_v	
1	289,208	239,735	17,1064
2	284,402	229,165	19,4223
3	1657,110	1660,600	0,2106
4	1622,454	1622,844	0,0240

6.6.2. Análises da estimativa dos tempos de trânsito para as medições de vazão

As Tabelas 6.8 a 6.11 apresentam os dados de tempo de trânsito referentes às medições de vazão descritas na seção 6.5. O anexo I contém os gráficos *boxplot* referentes aos tempos de trânsito estimados nas quatro medições de vazão. Um detalhe relevante às

tabelas é a coluna *Resol* que representa a resolução do sistema de medição de tempo de trânsito. Esta resolução foi assumida, sendo metade do tempo de amostragem ($T_s/2$) escolhido para o processo de amostragem do sinal. Logo, o tempo de amostragem é igual a 16 ns. O valor da resolução foi adotado levando-se em conta o processo de estimativa de ToF, que possui um sistema de interpolação de dados usado para determinar picos máximos da função de correlação cruzada.

Tabela 6.8. Quadro de tempo de trânsito nas medições de vazão para trajetória 1

Med.	Resol.	t_{zero}	t_{UP}	$s_{t_{UP}}$	t_{DOWN}	$s_{t_{DOWN}}$	Δt	$s_{\Delta t}$	$s_{\Delta t}/\Delta t$	$r/\Delta t$
	[ns]	[ns]	[ns]	[ns]	[ns]	[ns]	[ns]	[ns]		
1	8	17,215	218488,743	3,622	218437,205	3,237	34,323	4,857	0,1415	0,2331
2	8	17,215	218485,758	2,684	218434,709	2,858	33,834	3,920	0,1159	0,2364
3	8	17,215	218486,787	7,616	218277,160	9,650	192,412	12,293	0,0639	0,0416
4	8	17,215	218469,230	10,631	218262,652	11,210	189,364	15,450	0,0816	0,0422

Tabela 6.9. Quadro de tempo de trânsito nas medições de vazão para trajetória 2

Med.	Resol.	t_{zero}	t_{UP}	$s_{t_{UP}}$	t_{DOWN}	$s_{t_{DOWN}}$	Δt	$s_{\Delta t}$	$s_{\Delta t}/\Delta t$	$r/\Delta t$
	[ns]	[ns]	[ns]	[ns]	[ns]	[ns]	[ns]	[ns]		
1	8	62,731	393289,611	5,088	393199,309	4,671	27,571	6,907	0,2505	0,2902
2	8	62,731	393281,166	3,234	393193,759	3,761	24,676	4,960	0,2010	0,3242
3	8	62,731	393324,559	10,642	392910,262	11,346	351,566	15,556	0,0442	0,0228
4	8	62,731	393290,994	16,428	392888,628	12,307	339,635	20,526	0,0604	0,0236

Tabela 6.10. Quadro de tempo de trânsito nas medições de vazão para trajetória 3

Med.	Resol.	t_{zero}	t_{UP}	$s_{t_{UP}}$	t_{DOWN}	$s_{t_{DOWN}}$	Δt	$s_{\Delta t}$	$s_{\Delta t}/\Delta t$	$r/\Delta t$
	[ns]	[ns]	[ns]	[ns]	[ns]	[ns]	[ns]	[ns]		
1	8	14,107	395434,826	5,666	395350,676	5,066	70,043	7,601	0,1085	0,1142
2	8	14,107	395428,295	3,604	395345,607	3,051	68,581	4,722	0,0688	0,1167
3	8	14,107	395474,769	9,010	395066,539	12,966	394,123	15,789	0,0401	0,0203
4	8	14,107	395444,623	14,253	395069,306	78,616	361,210	79,897	0,2212	0,0221

Tabela 6.11. Quadro de tempo de trânsito nas medições de vazão para trajetória 4

Med.	Resol.	t_{zero}	t_{UP}	$s_{t_{UP}}$	t_{DOWN}	$s_{t_{DOWN}}$	Δt	$s_{\Delta t}$	$s_{\Delta t}/\Delta t$	$r/\Delta t$
	[ns]	[ns]	[ns]	[ns]	[ns]	[ns]	[ns]	[ns]		
1	8	25,173	222399,731	3,420	222343,417	3,954	31,141	5,228	0,1679	0,2569
2	8	25,173	222396,706	2,924	222340,192	2,875	31,340	4,101	0,1308	0,2553
3	8	25,173	222414,691	7,023	222202,242	7,900	187,276	10,571	0,0564	0,0427
4	8	25,173	222398,233	7,827	222191,513	7,850	181,547	11,086	0,0611	0,0441

A razão entre a resolução da medição de ToF (r) e a diferença de tempo de trânsito (Δt_i) é mostrada na última coluna das Tabelas 6.8 a 6.11. Esta razão representa a influência da resolução de medição do tempo de trânsito no processo de determinação da diferença de tempo de trânsito. Isto é significativo, uma vez que a vazão é diretamente proporcional ao Δt das trajetórias envolvidas no processo de medição de vazão. Observou-se que, para pequenos níveis de vazão, medição 1 e 2, esta relação foi relativamente alta, enquanto para medições de escoamento maiores, medição 3 e 4, apresentaram valores muito inferiores aos da 1ª e 2ª medição. Logo, a confiabilidade das medições de Δt e, por consequência, medições de vazão são maiores para as medições 3 e 4. Isto é comprovado levando-se em conta os valores da Tabela 6.7.

Os desvios padrões $s_{t_{down}}$ e $s_{t_{up}}$ apresentam valores baixos, salvo o valor $s_{t_{down}}$ da medição 4 da terceira trajetória que apresentou um valor de 79,897 ns, muito superior aos encontrados nas demais colunas.

Os dados exibidos nas colunas $s_{\Delta t}/\Delta t$ representam a razão entre o desvio padrão da diferença de tempo de trânsito e o valor médio da diferença do tempo de trânsito. Esta razão seguiu o mesmo efeito para todas as colunas, nas quais as medições 1 e 2 apresentaram valores altos, enquanto medições 3 e 4 apresentaram valores menores, salvo pela medição 4 da terceira trajetória, que apresentou um valor discrepante. Analisando-se a Figura I.8 do anexo I, foi possível observar que há uma maior dispersão dos dados de medição de tempo de trânsito que acabaram influenciando no desvio padrão desta medida. Uma observação importante é que os dados da Figura I.8 passaram pelo processo de eliminação de *outliers* e não foram reconhecidos como sendo *outliers*.

6.6.3. Análises dos perfis de velocidade

A Tabela 6.12 mostra os dados referentes às estimativas de velocidade média axial para cada trajetória acústica nas quatro medições de vazão. As Figuras 6.29 a 6.32 mostram o perfil de velocidade estimado pelas trajetórias acústicas para cada medição.

Tabela 6.12. Velocidade axial média por trajetória para as 4 medições

(m/s)	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4
$v_{ax,1}$	0,283	0,278	1,585	1,560
$v_{ax,2}$	0,131	0,118	1,677	1,620
$v_{ax,3}$	0,330	0,323	1,859	1,704
$v_{ax,4}$	0,247	0,249	1,489	1,443

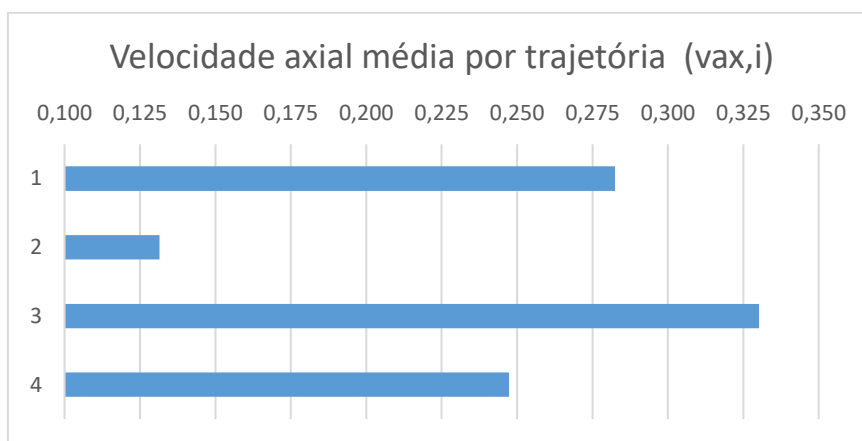


Figura 6.29. Perfil de velocidade estimado pelo algoritmo de velocidade – medição 1

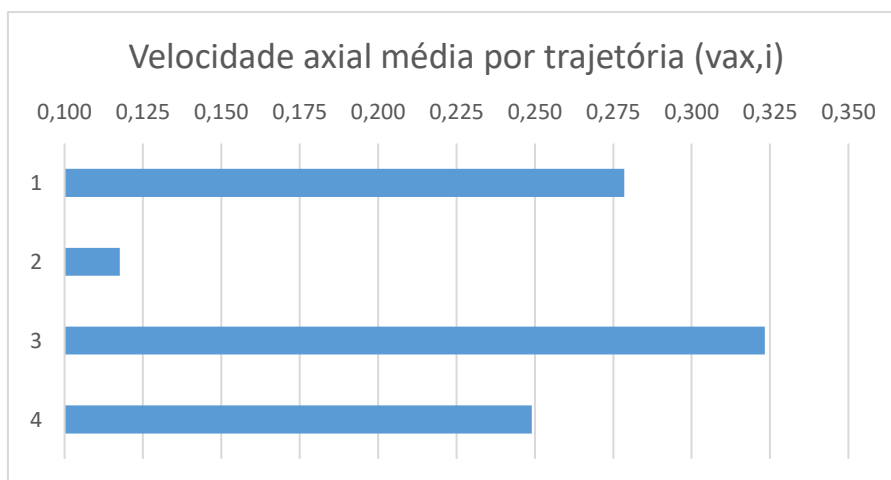


Figura 6.30. Perfil de velocidade estimado pelo algoritmo de velocidade – medição 2

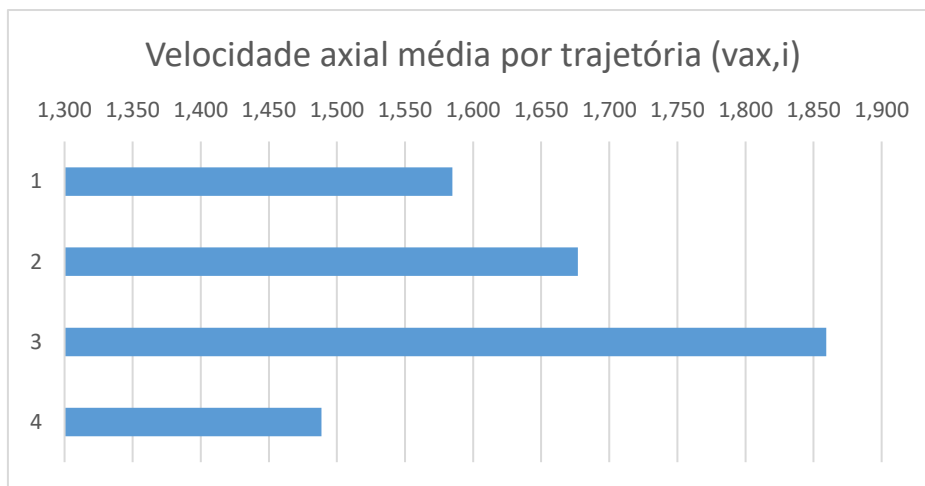


Figura 6.31. Perfil de velocidade estimado pelo algoritmo de velocidade – medição 3

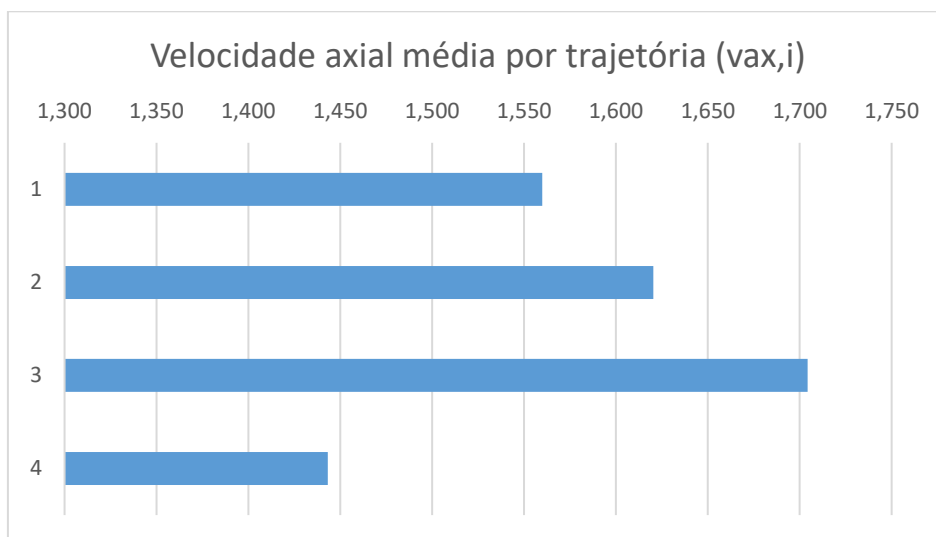


Figura 6.32. Perfil de velocidade estimado pelo algoritmo de velocidade – medição 4

Observando-se o perfil de velocidade estimado nas Medições 1 e 2, Figuras 6.29 e 6.30, respectivamente, percebe-se certa anomalia nas velocidades da trajetória 2 nos dois casos. Devido à proposição teórica do capítulo 2, as velocidades apresentariam perfis de velocidades tendendo a uma forma convexa. Logo, pode-se observar que algo afetou a estimativa de velocidade da trajetória 2.

Uma alternativa utilizada por muitos equipamentos de medição ultrassônicos, quando ocorrem problemas em uma trajetória acústica, é utilizar os valores da trajetória equidistante e utilizar os valores estimados desta trajetória como valores estimados da trajetória com defeito. Aplicando-se este critério para a trajetória 2, os dados da trajetória 3 foram utilizados, uma vez que as mesmas estão instaladas de forma equidistante do

diâmetro do conduto. Os novos perfis de velocidades para medições 1 e 2 podem ser observados nas Figuras 6.33 e 6.34.

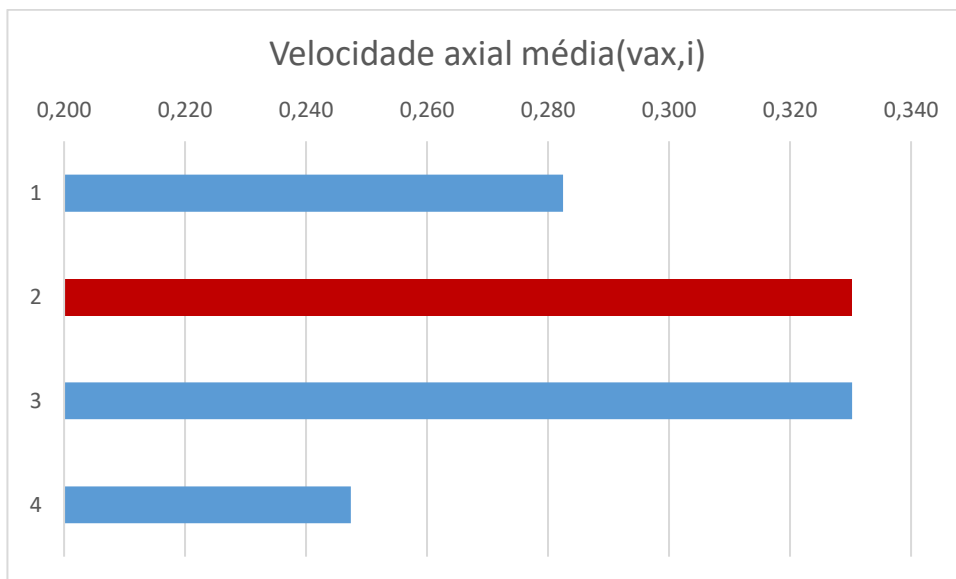


Figura 6.33. Perfil de velocidade com alteração da trajetória 2 – medição 1

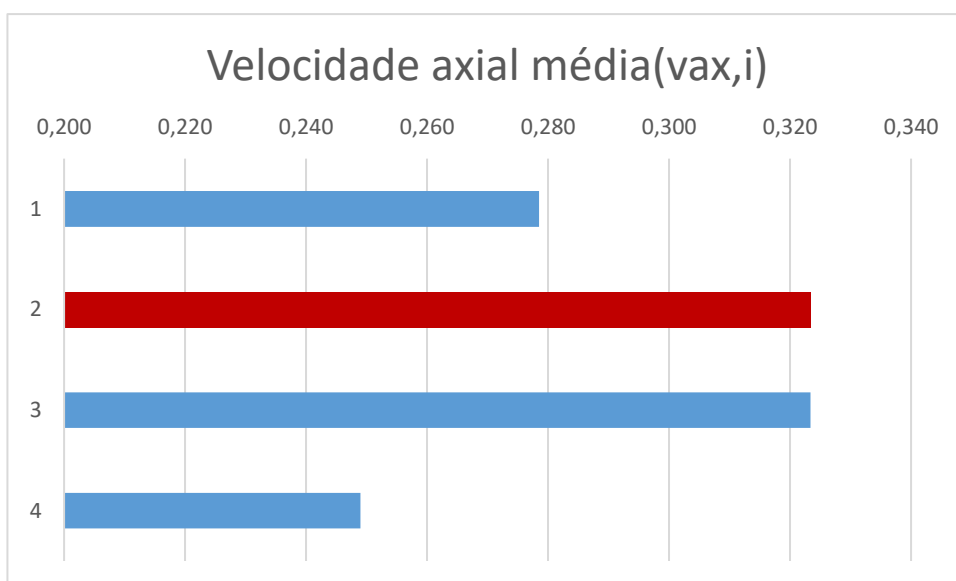


Figura 6.34. Perfil de velocidade com alteração da trajetória 2 – medição 2

Recalculando-se a vazão, utilizando-se a Eq. 2.44 e os dados da Tabelas 6.8 e 6.9, as novas vazões estimadas para medição 1 e 2 foram $\bar{Q}_{V_1} = 303,897 \text{ m}^3/\text{h}$ e $\bar{Q}_{V_2} = 289,594 \text{ m}^3/\text{h}$. Os erros relativos à média do laboratório foram de $\varepsilon_1(\%) = 5,079\%$ e $\varepsilon_2(\%) = 4,990\%$.

6.7. Comentários e discussões

Os testes realizados no laboratório Incontrol foram importantes para analisar o comportamento do protótipo do MVU em relação a um ambiente de vazão controlado. Foram realizadas quatro medições de vazão e comparou-se com os resultados do protótipo. Os resultados foram satisfatórios para apontar melhorias no sistema de medição. Futuramente serão feitos outros experimentos no laboratório.

Capítulo 7 – Conclusão

7.1. Conclusões acerca do trabalho desenvolvido

Este trabalho apresentou o desenvolvimento de um medidor de vazão ultrassônico de multi-trajetórias aplicado para medição de escoamento de água em sistemas hidráulicos. O método multi-trajetórias envolve o conceito de tempo de propagação de ondas ultrassônicas denominado Tempo de Trânsito. A explicação do desenvolvimento foi apresentada em três diferentes frentes: *desenvolvimento do hardware MVU; desenvolvimento dos algoritmos de processamento de sinais e dados; e o desenvolvimento do software.*

O *hardware* desenvolvido é capaz de controlar até oito trajetórias acústicas. Adotou-se um sistema utilizando um multiplexador para controlar as ações das trajetórias acústicas, pois, com isso, o custo de *hardware* diminui devido, principalmente, ao uso de poucos ADC's no sistema de aquisição de sinais, redução do uso de AGC's e menos uso de pulsadores para excitar os transdutores. A desvantagem do uso de um multiplexador está principalmente no processo de multiplexação de várias trajetórias acústicas, quando as mesmas possuem grandes comprimentos, devido ao fato de estas terem Tempos de Trânsitos elevados. Porém, é possível maximizar a eficiência do sistema de multiplexação mudando o modo como o multiplexador opera. Outro fato importante a se destacar no *hardware* é a sua capacidade de variar os tipos de sinais de excitação de transdutores, fato este de extrema importância, pois diferentes tipos de transdutores podem ser empregados para um mesmo sistema. Foram feitos vários testes de *hardware* utilizando diferentes transdutores e os resultados foram satisfatórios. Um fator importante que se notou durante o teste do *hardware* foi a influência do comprimento dos cabos de conexão dos transdutores na eletrônica do sistema, limitando ao comprimento de 25 m por cabo.

O ADC utilizado apresenta características importantes que facilitaram o desenvolvimento do protótipo. A capacidade de variar o tempo de amostragem do sistema, chegando a um valor de tempo de 2 ns, é um fator positivo em um desenvolvimento. Isto auxilia a encontrar um tempo de amostragem ótimo para diferentes tipos de operação do MVU. Também, o ADC possibilita uma rápida transmissão de dados para a central de processamento de dados. Outras características importantes são os

recursos adicionais de processamento de dados e o fato de haver recursos de desenvolvimento de softwares para diferentes linguagens de programação.

O capítulo quatro, relacionado ao processamento de sinal e dados, apresentou os algoritmos envolvidos no processo de medição de vazão. Como descrito, a técnica utilizada para medir o tempo de trânsito foi a Correlação Cruzada, pois, devido a várias referências bibliográficas e também a algumas simulações feitas, esta técnica teve menos sensibilidade à influência da modificação do sinal ultrassônico com relação a técnicas consagradas, tais como *Threshold* e *Zero-Crossing Detection*. Logo, adotou-se como padrão a técnica de *Cross-Correlation*. Uma função de interpolação parabólica foi utilizada na Função de Correlação Cruzada para determinar o pico máximo da função de correlação cruzada, além do tempo de amostragem. As simulações feitas utilizando o algoritmo de estimativa de Tempo de Trânsito descritas ao longo do capítulo mostraram bons resultados.

Um *software* foi desenvolvido e apresentado no capítulo cinco. Todo o seu *layout* foi pensado para ser utilizado com uma tela de toque. Foram criadas telas de configuração, comunicação, calibração e medição.

Para validar o sistema desenvolvido, um laboratório especializado em calibração de vazão foi contratado. Foram realizadas quatro medições de vazão. É possível observar na análise da seção 6.6.1 que para baixos valores de vazão, medições 1 e 2, os erros relativos foram altos, 17,11 % e 19,42 %. Nas duas outras medições, os resultados obtidos foram satisfatórios. Obtiveram-se erros relativos de 0,2106 % e 0,024 % para medição 3 e 4, respectivamente. A razão (s_{Q_V}/\bar{Q}_V) dada pelo desvio padrão da medição da vazão (s_{Q_V}) e a média das medições de vazão (\bar{Q}_V) apresentaram valores iguais a 4,71; 4,13; 1,59 e 2,61 % relativos à medição 1, 2, 3 e 4 respectivamente. Isto destaca que a dispersão dos dados medidos, o desvio padrão, representa valores inferiores a 5 % com relação à média.

Os tempos de trânsitos foram analisados na seção 6.6.2. A razão entre a resolução de tempo suposto na medição de ToF (r) e a diferença de tempo de trânsito (Δt_i) é mostrada na última coluna das Tabelas 6.8 a 6.11. Esta razão representa a influência da resolução de medição do tempo de trânsito no processo de determinação da diferença de tempo de trânsito. Isto é significativo, uma vez que a vazão é diretamente proporcional ao Δt das trajetórias envolvidas no processo de medição de vazão. Observou-se que, para

pequenos níveis de vazão, medição 1 e 2, esta relação foi relativamente alta, enquanto para medições de escoamento maiores, medição 3 e 4, apresentou valores muito inferiores aos da 1ª e 2ª medição. Logo, a confiabilidade das medições de Δt e, por consequência, medições de vazão, são maiores para as medições 3 e 4. Isto é comprovado levando-se em conta os valores da Tabela 6.7.

Os desvios padrões $s_{t_{down}}$ e $s_{t_{up}}$ apresentam valores baixos, salvo o valor $s_{t_{down}}$ da medição 4 da terceira trajetória que apresentou um valor de 79,897 ns muito superior aos encontrados nas demais colunas.

As colunas representadas por $s_{\Delta t}/\Delta t$ representam a razão entre o desvio padrão da diferença de tempo de trânsito e o valor médio da diferença do tempo de trânsito. Esta razão seguiu o mesmo efeito para todas as colunas, onde as medições 1 e 2 apresentaram valores altos, enquanto medições 3 e 4 apresentaram valores menores, salvo pela medição 4 da terceira trajetória, que apresentou um valor discrepante. Analisando a Figura I.8 do Anexo I foi possível observar que há uma maior dispersão dos dados de medição de tempo de trânsito que acabaram influenciando no desvio padrão desta medida. Uma observação importante é que os dados da Figura I.8 passaram pelo processo de eliminação de *outliers* e não foram reconhecidos como sendo *outliers*.

As análises dos perfis de velocidade mostraram dados interessantes em relação às medições 1 e 2. Observando as Figuras 6.29 e 6.30, as velocidades estimadas da trajetória 2 nos dois gráficos apresentaram valores duvidosos, tendo em vista a teoria de perfis de velocidade. De acordo com a teoria descrita no capítulo 2, os perfis de velocidade são semelhantes à Figura 2.3, enquanto os observados nas Figuras 6.29 e 6.30 apresentaram perfis distintos devido à trajetória 2. Uma suposição para este problema é que houve influência do meio de propagação das ondas ultrassônicas na estimativa de velocidade da trajetória 2, forçando um erro na estimativa de velocidade. Esta hipótese pode estar correta, ao considerar o valor da estimativa de correção de zero, $t_{zero} = 62,731$ ns, que apresentou o maior valor entre as trajetórias. Isto quer dizer que, mesmo sem escoamento, a diferença entre t_{UP} e t_{DOWN} da trajetória 2 apresentou uma grande variabilidade, comprovada claramente nos gráficos *bloxpot* das Figuras 6.15 e 6.16.

Quando se supõe as velocidades das trajetórias 2 iguais às da trajetória 3, os recálculos da vazão apresentam erros relativos à média do laboratório de $\varepsilon_1(\%) = 5,079\%$ e $\varepsilon_2(\%) = 4,990\%$ para medição 1 e 2, respectivamente. Estes

valores mostram um menor erro relativo em comparação aos valores da Tabela 6.7. Mais um fato indicando, portanto, que as estimativas de velocidade da trajetória 2 para as duas medições apresentaram possíveis erros.

Os experimentos realizados no laboratório mostraram bons resultados referentes ao desenvolvimento do medidor de vazão ultrassônico. É notório que muitas modificações ainda deverão ser realizadas e mais experimentos a serem feitos no laboratório para se levantar uma boa informação das futuras melhorias do sistema, porém, levando-se em conta os dados adquiridos na primeira medição de vazão real do equipamento, os resultados se mostraram satisfatórios e promissores para o futuro do desenvolvimento.

7.2. Trabalhos realizados

Este trabalho gerou um protótipo eletrônico de um Medidor de Vazão Ultrassônico de Multi-Trajelórias e também um *software* de controle do MVU. Obteve-se também a publicação de um Artigo na X Conferência de Pequenas Centrais Hidrelétricas – Mercado e Meio Ambiente, com o Título de *Desenvolvimento de um Medidor de Vazão Ultrassônico de Multi-Trajelórias por Tempo de Trânsito*.

7.3. Proposição para trabalhos futuros

Para trabalhos futuros, propõe-se:

- Melhoria do Algoritmo de Processamento Digital de Sinais e Dados;
- Análise das influências de grandezas físicas na estimativa de Tempo de Trânsito;
- Melhoria da Eletrônica do Sistema de Medição de Vazão;
- Experimento laboratorial para avaliar a influência de diferentes tempos de amostragem;
- Estudo de técnicas de processamentos de sinais estatísticos para aplicação no sistema;
- Desenvolvimento de um módulo Modbus;
- Aplicação de técnicas de processamento de sinais para o desenvolvimento de um Sistema Inteligente em Medições de Vazão Ultrassônicos.

Referência Bibliográfica

- [1] Pereira, M.; *Flow Meters: Part 18 in a series of tutorials in instrumentation and measurement*, vol. 1, IEEE Instrumentation Measurement Magazine, pp. 18-26, February 2009
- [2] Pereira M., *Flow Meters: Part 20 in a series of tutorials in instrumentation and measurement*, vol. 1, IEEE Instrumentation Measurement Magazine, pp. 21-27, June 2009
- [3] *Flow Research, Inc., Volume X: The World Market for Flowmeters, 6th Edition, 27 Water St. Wakefield, 2017*
- [4] Silva Ferreira A. L., *Tecnologia ultrassônica na medição de vazão em escoamentos incompressíveis, Tese, PUC RJ, Rio de Janeiro, 2010, orientador: Alcir de Faro Orlando*
- [5] Y. K. H. Koike, S. Wada, T. Taishi, M. Aritomi e M. Mori, “The Optimum Distribution of Cavitation Bubbles for a flow rate measurement using Ultrasonic Doppler Method,” IEEE Symposium on Ultrasonic, vol. 2, Oct. 2003.
- [6] D. Franklin, D. Baker e R. Rushmer, “Pulsed Ultrasonic Transit Time Flowmeter,” *Bio-Medical Electronic*, vol. 9, n. 1.
- [7] Dynasonics ultrasonic flow meters, [Online]. Available: consultado :https://loewener.dk/wp-content/files/5265_01_dynasonics_uf_dynasonics_ub_02_0635.pdf.
- [8] OIML R 117-1, Dynamic measuring systems for liquids other than water - Part 1: Metrological and technical requirements, OIML-ORGANISATION INTERNATIONALE DE METROLOGIE LEGALE, Edition 2007
- [9] OIML R 137-1, Gas meters - Part 1: Requirements, OIML- ORGANISATION INTERNATIONALE DE METROLOGIE LEGALE, Edition 2006
- [10] Webster, J. G.; Eren, Halit; *Measurement Instrumentation and Sensors Handbook: Spatial, Mechanical, Thermal and Radiation Measurement*; CRC Press; Boca Raton, ed 2, 2014
- [11] Lynnworth, C. L.; *Ultrasonic Flowmeters; Physical Acoustics, Vol. XIV*; 1979
- [12] Lynnworth, C. L., Liu Yi; *Ultrasonic flowmeters: Half-century progress report, 1955-2005*, Ultrasonic 44, Elsevier, 2006
- [13] Hydrovision;
Consultado: <http://www.hydrovision.de/> , consultado: 2017
- [14] Emerson;<http://www.emerson.com/catalog/en-us/automation-solutions/measurement-instrumentation/ultrasonic/daniel-3414> :
[consultado: 2017](http://www.emerson.com/catalog/en-us/automation-solutions/measurement-instrumentation/ultrasonic/daniel-3414)
- [15] Cameron; Cameron A Shlumberger Company
<https://cameron.slb.com/>; consultado: 2017

- [16] ABNT/ISO 12765 , *Medição De Vazão De Fluidos Em Conduitos Fechados - Métodos Usando Medidor De Vazão Ultrassônico Por Tempo De Trânsito*, ABNT, 2010.
- [17] IEC 60041 ; *Corrigendum 1 - Field acceptance tests to determine the hydraulic performance of hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines*, ed 3, 1996.
- [18] Faure Herman; “Ultrasonic Flowmeter Technology”; 1 1 2017 [Online]. Available:
<http://www.faureherman.com/our-technologies/ultrasonic-flowmeters/>
- [19] P. BRASSIER, *Débitmétrie par technique ultrasonore en milieu gazeux industriel*, É. D. d. S. P. e. d. L’Ingenieur, Ed., Bordeaux: L’Université Bordeaux I, 2000.
- [20] J. YODER, *Ultrasonic flow meters in the energy measurement spotlight*, Pipeline & Gas Journal, 2009.
- [21] Metering & Technology
<http://www.mnt-sas.com/> consultado: 2017
- [22] Flow Research Inc. :
<http://www.flowresearch.com/> consultado: 2017
- [23] PS Soluções; PS Soluções – Manutenção Preditiva, Monitoramento de Motores e P&D
<http://www.pssolucoes.com.br/index01.html> consultado: 2017
- [24] Robert W. Fox; Alan T. McDonald e Philip J. Pritchard ; *Introdução à Mecânica dos Fluidos* ; AMGH Editora, 6ª Ed., 2011
- [25] C. C. Martin, *Ultrassom*, 1 ed., São Paulo, SP: Abendi, 2012.
- [26] *Panametrics- NDT; Ultrasonic transducer Technical Notes; OLYMPUS.*
- [27] Muhammad Ashraf, Hamza Qayyum; High Accuracy Time of Flight Measurement Using Digital Signal Processing Techniques for Subsea Applications, *Journal of Signal and Information Processing*, 2011, 2, 330-335
- [28] *ASTM E 1065- Standard Guide for Evaluating Characteristics of Ultrasonic Sarch Units*, ASTM, American National Standard, 1999.
- [29] N. Ghasemi, *Improving Ultrasound Excitation Systems Using Flexible Power Supply with adjustable voltage and frequency to Drive Piezoelectric Transducer*, Tese ed., Queensland: Queensland University of Technology, 2012.
- [30] *Panametrics- NDT; Ultrasonic transducer Technical Notes; OLYMPUS.*
- [31] TRESCH, T.; GRUBER, P.; STAUBLI, T. Comparison of Integration methods for multipath acoustic discharge measurements. 6 International Conference on Innovation in Hydraulic Efficiency Measurements. Portland, Oregon, USA: IGHEM. 2006.
- [32] VOSER, A. Analyse und Fehleroptimierung der mehrpfadigen akustischen Durchflussmessung in Wasserkraftanlagen. ETH Zürich, Zürich, 1999.
- [33] Patente U. S. ; Patent 4109523;

- <https://www.google.ch/patents/US4109523?dq=inassignee:%22Westinghouse+Electric+Corp%22+ultrasonic+flow+meters&hl=en&sa=X&ved=0ahUKEwiugd-vkObTAhUOOZAKHQJfABsQ6AEITDAG>
- [34] Texas Instruments; Ultrasound Scanners
http://www.ti.com/solution/ultrasound_system consultado: 2017
- [35] Olympus IMS,
<http://www.olympus-ims.com/pt/ndt-tutorials/calibration/overview/> consultado: 2017
- [36] [Online]. Available: <http://www.ndt.net/ndtaz/ndtaz.php>. [Acesso em 21 03 2015].
- [37] Hans W. Persson, Electric excitation of ultrasound transducers for short pulse generation, *Ultrasound in Medicine & Biology*, Volume 7, Issue 3, Elsevier, 1981, Pages 285-289
- [38] D. Xiao , H. Ren, J. Shao e . C. Xu, “Response characteristics of ultrasonic transducer under different excitation pulses,” em *Nondestructive Evaluation/Testing: New Technology & Application (FENDT), 2013 Far East Forum on*, Jinan, China, 2013.
- [39] ISO 6416 Hydrometry — Measurement of discharge by the ultrasonic (acoustic) method; 2004
- [40] CAMACHO, J.; FRITSCH, C. Protection Circuits for Ultrasound Applications. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 55, n. 5, may 2008. 1160-1164
- [41] L. Svilainis, V. Dumbrava e A. Chaziachmetovas, “Investigation of the Half Bridge and Transformer Push–Pull Pulser Topologies for Ultrasonic Transducer Excitation,” *Journal of Circuits, Systems and Computers*, vol. 24, nº 5, junho 2015.
- [42] Y. Wang, “New-type Ultrasonic Flow meter design based on FPGA High-speed Data Sampling,” em *9th International Conference on Electronic Measurement & Instruments*, Beijing, China, 2009.
- [43] Q. Chen, W. Li e J. Wu, “Realization of a multipath ultrasonic gas flowmeter based on transit-time technique,” *Ultrasonics, Elsevier*, vol. 54, pp. 285-290, 2013.
- [44] Texas Instruments, “PRU-ICSS,” Texas Instruments, 01 01 2017. [Online]. Available: <http://processors.wiki.ti.com/index.php/PRU-ICSS>. [Acesso em 01 03 2017].
- [45] J. P. A. Pérez, S. C. Pueyo e B. C. López, *Automatic Gain Control - Techniques and Architectures for RF Receivers*, 1 ed., New York, USA: Springer, 2011.
- [46] Linas Svilainis, Kaunas, Review of high resolution time of flight estimation techniques for ultrasonic signals, University of Technology, Department of Signal Processing
- [47] Raya, R , Ceres, R. , Frizera A., Rocon, E., Design and evaluation of a fast model-based algorithm for ultrasonic range measurements; *Sensors and Actuators A Physical* , November 2008
- [48] Shyh-Biau Jiang, Chi-Ming Yang, Rui-Song Huang, Chao-Yi Fang, and Tse-Liang Yeh; An Innovative Ultrasonic Time-of-Flight Measurement Method Using Peak Time Sequences of Different Frequencies: Part I; *IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT*; VOL. 60, NO. 3, MARCH 2011

- [49] Villanueva, J M M; Toledo, L ; Ultrasonic Time-of-Flight Estimation based on Maximum Likelihood Data Fusion using Triangular Distribution; IEEE 2014.
- [50] M. Parrilla, J. J. Anaya, and C. Fritsch ; Digital Signal Processing Techniques for High Accuracy Ultrasonic Range Measurements; IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT, VOL. 40. NO. 4. AUGUST 1991
- [51] Svilainis, L., Dumbrava, V.; Analysis of the interpolation techniques for time-of-flight estimation; Ultragarsas (Ultrasound), Vol. 63, No 4, pag 25-29, 2008
- [52] Svilainis, L., Dumbrava, V., Lukoseviciute, K., Chaziachmetovas, A.; Subsample interpolation bias error in time-of-flight estimation by direct correlation in digital domain; Measurement, Elsevier, December 2013, pag 3950-3958, 2013
- [53] Vaseghi S. V.; Interpolation; Advanced Digital Signal Processing and Noise Reduction, Second Edition, John Wiley&Sons Ltd., pag 297-332, 2000
- [54] Montgomery, D. C., Runger, G. C.; Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros, 5ª ed., LTC, Rio de Janeiro, 2015
- [55] S. Hoyos; J. Bacca; G. R. Arce ; Spectral design of weighted median Filters: A general iterative approach; IEEE Transactions on Signal Processing;, Volume: 53; 2005
- [56] Incontrol, “Laboratório de Vazão - Calibração,” Incontrol, 1 1 2017. [Online]. Available: <http://www.incontrol.ind.br/vazao.php>. [Acesso em 1 1 2017].
- [57] Inmetro,
http://www.inmetro.gov.br/laboratorios/rbc/detalhe_laboratorio.asp?num_certificado=432&area=VAZ%C3%20E%20VELOCIDADE%20DE%20FLUIDOS
- [58] ABNT - NBR ISO 4185, “MEDIÇÃO DE VAZÃO DE LÍQUIDOS EM DUTOS FECHADOS — MÉTODO GRAVIMÉTRICO”.ABNT - NBR ISO.
- [59] Grubbs, F. E. ; Procedures for Detecting Outlying Observations in Samples; Technometrics; Febuary, 1969
- [60] Barnet, V. and T. Lewis; Outliers in Statistical Data ; Wiley Series in Probability and Methematica Statistics; Chischester, 1994
- [61] Rennosonic , RTL Rennosonic Tecnologia LTDA
<http://www.renno.com.br/rennosonic/Pagina.do> ,consultado: 2017

Apêndice I – Estudo de medição de vazão por Tempo de Trânsito

1. Teoria de operação ultrassônica

Existem diferentes tipos de medidores de vazão ultrassônico que se distinguem no princípio de funcionamento aplicando ondas ultrassônicas. As tecnologias desses medidores se apoiam basicamente em três tipos distintos de medidores de vazão o por efeito Doppler [A1]; por Correlação[A2]; e por Tempo de Trânsito [A3].

Medidores de vazão ultrassônico por efeito Doppler enviam pulsos ultrassônicos e capturam os ecos de sinais refletidos por partículas no fluido [A1]. Neste método, os sinais ultrassônicos refletidos para o transdutor pelas partículas no fluido são deslocados em frequência sendo estes deslocamentos proporcionais à velocidade da partícula e, conseqüentemente, a do fluido. Os medidores de vazão por correlação usam um dispositivo para perturbar o fluxo no fluido e, em seguida, correlacionam os sinais transmitidos nesta perturbação com a velocidade média do fluxo [A2].

Por sua vez, a técnica por tempo de trânsito é embasada no princípio de troca de sinais entre dois transdutores numa trajetória acústica [A3]. Um pulso ultrassônico é emitido de um primeiro transdutor e o tempo decorrido para o pulso chegar em um segundo transdutor receptor, deslocado a montante ou a jusante do transdutor transmissor, é medido. Após isso, o transmissor e o receptor mudam o sentido de transmissão e o pulso é enviado à direção oposta. A diferença entre o tempo de propagação a jusante e a montante, Δt , pode ser diretamente proporcional a velocidade média do fluido integrado como será visto numa próxima seção. Para determinar a velocidade média num fluxo, severas suposições são requeridas, tais como, o comprimento da trajetória acústica é uma constante, L , a velocidade do som no fluido é constante, c_0 , e um perfil de velocidade deve ser assumido para o fluido no sistema, $v_{ax} = F(z)$, para um sistema coordenado como mostrado na Figura 1. Finalmente, para determinar a vazão num sistema a velocidade medida é integrada .

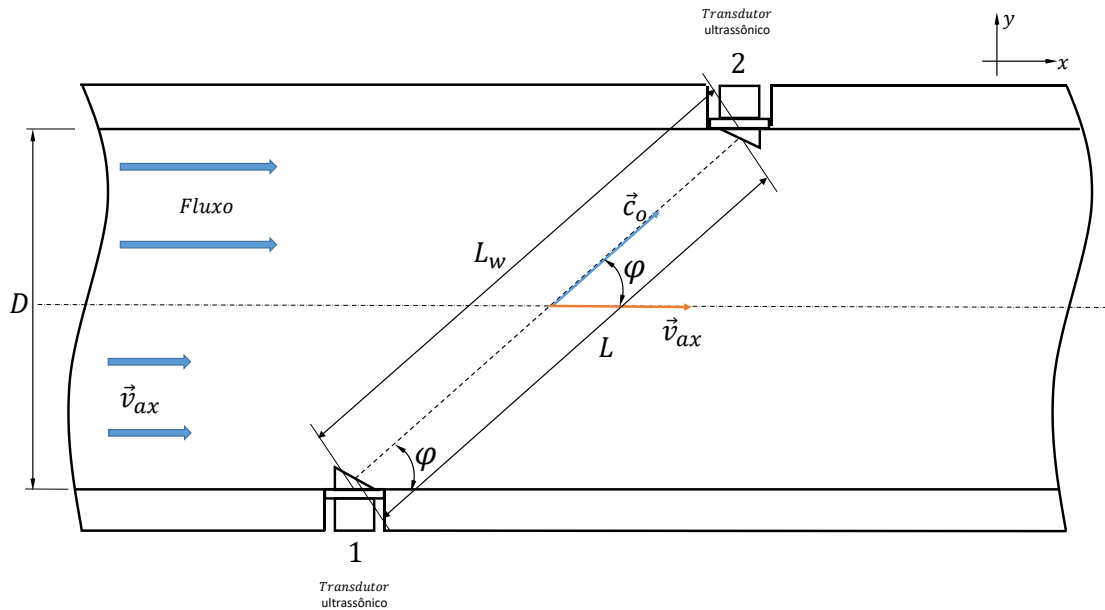


Figura 1. Representação de uma trajetória acústica em medições de vazão por tempo de trânsito

2. Bases da operação do medidor de vazão por tempo de trânsito

Se o tempo requerido para as ondas ultrassônicas se propagarem entre dois transdutores numa condição de fluxo é comparado com o tempo requerido numa segunda condição de fluxo, a mudança na taxa de fluxo integrada entre as condições é detectada [A4]. Se uma dessas condições não é uma condição de fluxo, então a taxa de fluxo médio na outra condição pode ser determinada. Esta habilidade para determinar o fluxo médio em um sistema resulta no fato de que o som é transportado ao longo do meio ao qual está se propagando. A velocidade da onda ultrassônica total (\vec{v}) se propagando na trajetória com a influência do fluxo é definida como a soma vetorial

$$\vec{v} = \vec{c}_0 + \vec{v}_{ax}, \quad (\text{Eq. A1})$$

onde, \vec{c}_0 é o vetor representante da velocidade do som na trajetória acústica e \vec{v}_{ax} é o vetor representante da velocidade média axial. A Figura 2 ilustra os efeitos da soma vetorial das velocidades do som e da velocidade média axial.

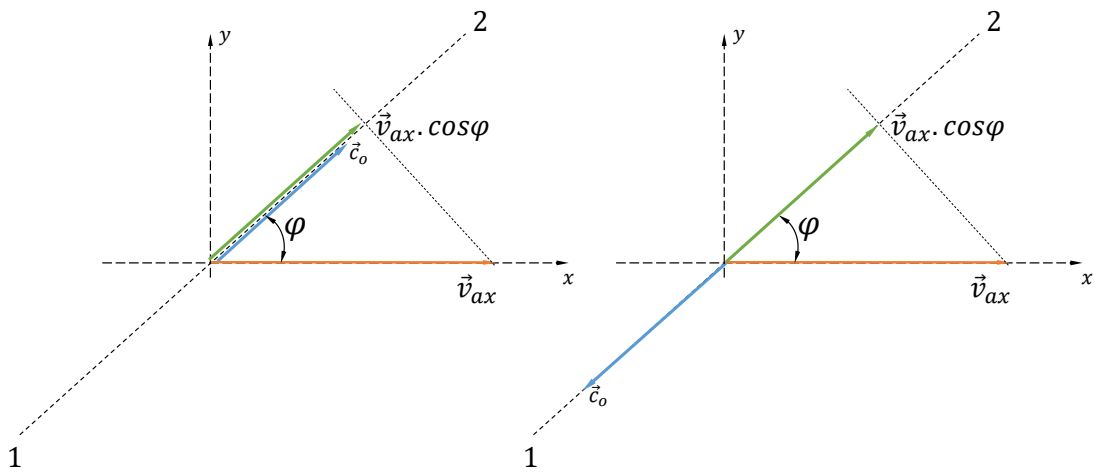


Figura 2. Representação vetorial de propagação de onda e fluxo; a- Propagação à Jusante (Downstream); b- Propagação à Montante (Upstream)

Observando a Figura 2-a, a onda sonora se propaga do transdutor 1 para o transdutor 2, no sentido do fluxo, logo a soma resultante da velocidade absoluta é dada por

$$v = c_0 + \bar{v}_{ax} \cdot \cos \varphi , \quad (\text{Eq. A2})$$

onde, c_0 é o valor da velocidade do som medido na trajetória e \bar{v}_{ax} é o valor absoluto da velocidade média do fluxo. Quando para a onda sonora se propagando contra o fluxo, sentido do transdutor 2 para transdutor 1 (Figura 2-b), a velocidade absoluta é dada por

$$v = c_0 - \bar{v}_{ax} \cdot \cos \varphi . \quad (\text{Eq. A3})$$

Portanto, a velocidade da onda descrita na equação 2 será menor que a velocidade descrita na equação 1, como visto na referência estacionária.

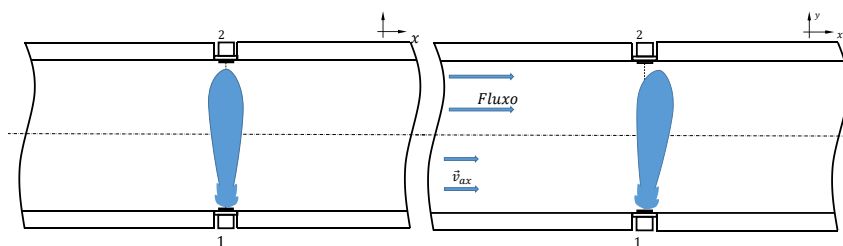


Figura 3. a- Forma do feixe de propagação de onda ultrassônica; b- Pequeno desvio da trajetória do feixe por causa da presença do fluxo

Tipicamente, as ondas sonoras usadas para medir a taxa de fluxo médio num sistema estão na faixa ultrassônica, porque a alta frequência e um curto comprimento de onda facilitam a precisão da medição de tempo de trânsito para o pulso sonoro através do fluxo [A4]. As ondas ultrassônicas são geradas usando transdutores ultrassônicos, os quais podem agir como transmissor e receptor. A onda gerada por estes transdutores é um pulso intenso fortemente amortecido. Os transdutores usados nos dispositivos de medição de fluxo são projetados para produzir relativamente frente de ondas planas, as quais propagam num feixe direcional através do fluido e se espalham num angulo de poucos graus [A5], como mostrado na figura 3.a. Como o feixe se propaga através de um campo de velocidade, este interage com a velocidade do fluido e pode ser desviar da trajetória original, ou desacelerar essas interações, como mostrado na Figura 3.b.

3. Tempo requerido para ondas sonoras para propagar através de um campo de fluxo

3.1. Trajetórias acústicas Perpendiculares

Figura 4 mostra uma geometria na qual o som é enviado diretamente através de um conduto na direção y , esta é uma circunstância especial e é mostrada aqui. Se há um fluxo não turbulento uniforme ao longo do eixo axial x , na direção do conduto, deve ser assumido que a velocidade do fluido não sofreria efeito da velocidade de propagação na direção y . O efeito apenas na onda sonora está na direção x e está na flexão da onda sonora a jusante na direção do fluxo, a qual, em severos casos, é ignorado. No entanto, se a velocidade do som é assumida ser uniforme através do fluxo, é possível calcular o tempo requerido para as ondas acústicas atravessar o fluxo mostrado na Figura 4 por usar a relação:

$$dt = \left(\frac{d\bar{n}}{c_0} \right) \cdot \hat{n} \quad (\text{Eq. A4})$$

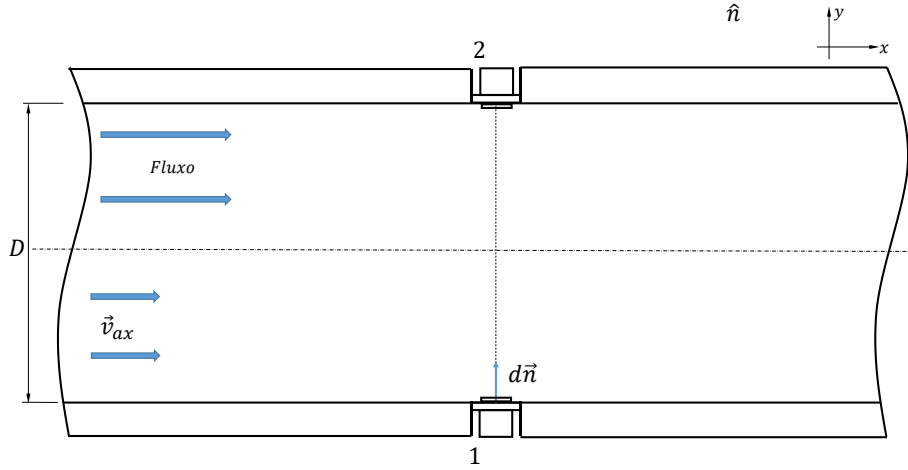


Figura 4. Configuração para propagação de onda perpendicular ao fluxo

onde: \vec{n} é o vetor ao longo da trajetória acústica, e dt é o valor infinitesimal do tempo de propagação. Também, $c_0 = \frac{1}{L} \int_0^L c \, dy$ é a velocidade média do som na trajetória. Uma vez que \hat{n} é paralela a trajetória acústica e integrando sob o tempo e sobre o comprimento da trajetória, L produz

$$t = \int_0^L \frac{dn}{c_0} \quad (\text{Eq. A5})$$

onde dn é a integração da trajetória, finalmente chegando em

$$t = \frac{L}{c_0} \quad (\text{Eq. A6})$$

3.2. Ângulo na trajetória

É fácil calcular o tempo requerido através de um campo de fluxo perpendicular ao eixo x , contudo, é um pouco mais difícil calcular o tempo quando a trajetória possui uma inclinação. A razão é que a velocidade do fluido ao longo da trajetória acústica deve ser contabilizada. Na Figura 5, a onda acústica é retratada como sendo introduzida até o campo de fluxo num ângulo, φ . O tempo para atravessar o conduto para o receptor é dado por

$$dt = \frac{d\vec{n}}{c_0 + \bar{v}_{ax} \cdot \cos\varphi} \cdot \hat{n} \quad (\text{Eq. A7})$$

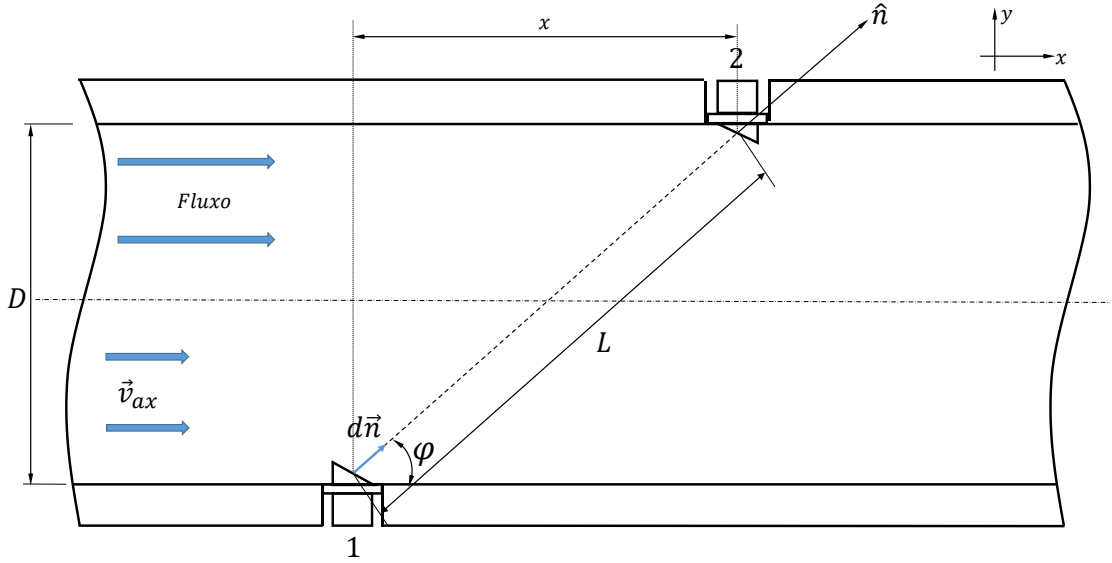


Figura 5. Configuração para propagação de onda com trajetórias contendo um ângulo

Para interagir sob tempo e o comprimento da trajetória, e usando a Figura 5 onde o fluxo é assumido ser paralelo ao eixo x , então não existe a velocidade transversal na direção y , ou $v_{tr} = 0$, resultando em

$$t = \int_0^L \frac{dn}{c_0 + \bar{v}_{ax} \cdot \cos\varphi} \quad (\text{Eq. A8})$$

Ainda assumindo que c_0 e \bar{v}_{ax} são constantes em ambos tempo e espaço, e a integração da equação 8 resulta em

$$t = \frac{L}{c_0 + \bar{v}_{ax} \cdot \cos\varphi} \quad (\text{Eq. A9})$$

onde, $\bar{v}_{ax} = \frac{1}{L} \int_0^L v_{ax} \cdot dy$ e $c_0 = \frac{1}{L} \int_0^L c \, dy$

A velocidade média axial do fluido foi assumida ser constante ao longo da trajetória acústica para realizar a integração [A4].

Para chegar na equação 9, duas suposições básicas são feitas na literatura. A primeira é que o fluxo é uniforme. A segunda suposição é que a velocidade do som é constante ou tem um valor médio ao longo do fluido. Estes pressupostos medem o fluxo tanto temporal como espacialmente, porque a velocidade é calculada ao longo de um

tempo constante e calculada na média ao longo do comprimento do percurso, L . Portanto, a equação 9, extensivamente usada como uma equação para medição de vazão, é melhor utilizada em condições de fluxo ideais. No entanto, a presença de fluxos secundários são conhecidos e causam significantes imprecisões de medição [A4]. Então a identificação do efeito introduzido pelo fluxo não ideal é crucial para precisão da medição do fluxo.

4. Cálculo da velocidade por medidores de vazão ultrassônicos na literatura

A Figura 6 ilustra o arranjo de uma trajetória acústica num conduto fechado que é o esquema base encontrado na literatura e descrito na norma IEC 41 [A3].

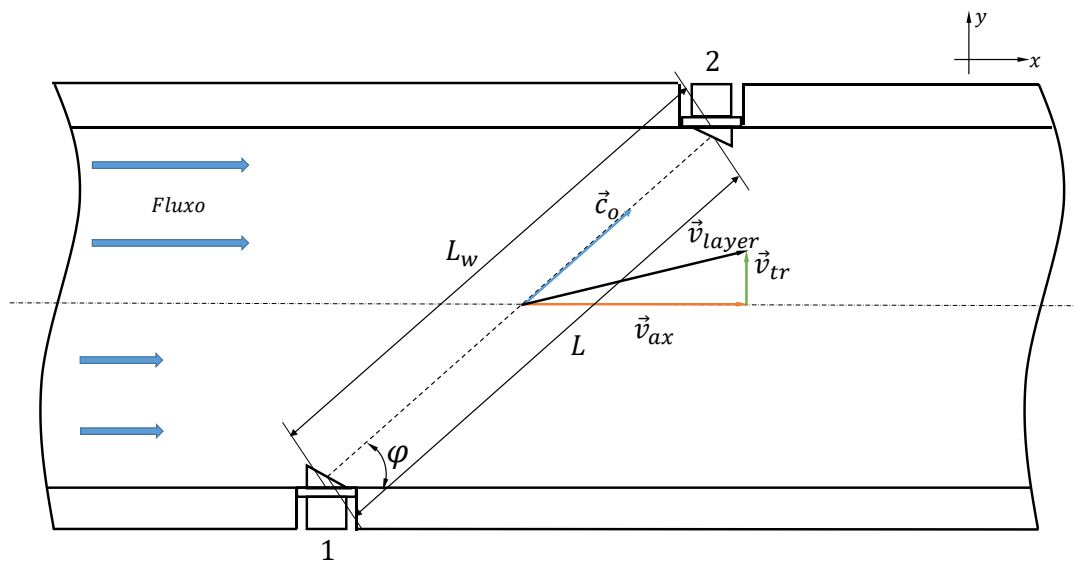


Figura 6. Representação do cálculo de Tempo de Trânsito

Alguns termos são importantes de destacar: L_w é o comprimento da trajetória medida em referência a parede ; L comprimento da trajetória entre as faces dos transdutores; $L_T = L_w - L$ é comprimento formado pela saliência do transdutor fator que influência nos cálculos da medição de vazão; φ é ângulo formado pela trajetória tipicamente definida entre 30° e 75° sendo os usos mais tradicionais 45° e 65° ; \vec{v}_{ax} é definida como a velocidade axial média do fluxo do fluido; v_{tr} é a velocidade transversal influenciado por fluxos turbulentos; e \vec{v}_{layer} a soma vetorial das velocidades \vec{v}_{ax} e \vec{v}_{tr} . Para um tratamento simplificado das expressões dos cálculos da velocidade média axial, ignora-se a presença de velocidades transversais no fluxo do fluido e supõe que a L_T é suficiente irrisório convergindo para $L = L_w$.

Para o cálculo do tempo a jusante [A3] (*downstream*, propagação da onda ultrassônica do transdutor 1 para 2) caracterizado por t_{12} sendo

$$t_{12} = \frac{L}{c_0 + \bar{v}_{ax} \cdot \cos\varphi} \quad (\text{Eq. A10})$$

e à montante [A3] (*upstream*, propagação da onda ultrassônica do transdutor 2 para 1) dado por t_{21} é

$$t_{21} = \frac{L}{c_0 - \bar{v}_{ax} \cdot \cos\varphi} \quad (\text{Eq. A11})$$

As equações 10 e 11 podem ser usadas para avaliar explicitamente a expressão para a velocidade média axial \bar{v}_{ax} .

Existem severos métodos para cálculos de velocidade uma vez que os tempos para uma onda acústica para propagar à jusante e à montante são medidos diretamente pelos medidores de vazão. Manipulando as equações 10 e 11 chega-se as seguintes definições

$$c_0 = \frac{L}{t_{12}} + \bar{v}_{ax} \cdot \cos\varphi \quad (\text{Eq. A12})$$

e

$$c_0 = \frac{L}{t_{21}} - \bar{v}_{ax} \cdot \cos\varphi \quad (\text{Eq. A13})$$

Ainda a velocidade do som é tipicamente assumida ser constante e resolvendo as equações 12 e 13 para obter \bar{v}_{ax} implica em

$$\frac{L}{t_{12}} + \bar{v}_{ax} \cdot \cos\varphi = \frac{L}{t_{21}} - \bar{v}_{ax} \cdot \cos\varphi$$

$$\bar{v}_{ax} = \frac{L}{2 \cdot \cos\varphi} \cdot \left(\frac{t_{21} - t_{12}}{t_{12} \cdot t_{21}} \right) \quad (\text{Eq. A14})$$

ou

$$\bar{v}_{ax} = \frac{L^2 \cdot \tan \varphi}{2 \cdot D} \cdot \left(\frac{\Delta t}{t_{12} \cdot t_{21}} \right) \quad (\text{Eq. A15})$$

Estas equações representam a velocidade média axial ao longo da trajetória acústica em termos dos tempos de propagação, mas requer conhecimentos precisos das trajetórias acústicas entre os transdutores, L , D e o ângulo, φ . Outras equações [A6] são desenvolvidas através de um método similar, no entanto, estas eliminam o ângulo da trajetória da fórmula, estas são:

$$\bar{v}_{ax} = \frac{L^2}{2 \cdot \sqrt{(L^2 - D^2)}} \cdot \left(\frac{\Delta t}{t_{12} \cdot t_{21}} \right) \quad (\text{Eq. A16})$$

e

$$\bar{v}_{ax} = \frac{L \cdot \Delta t}{2 \cdot T^2 \cos \varphi} \quad (\text{Eq. A17})$$

onde $T = \frac{t_{12} + t_{21}}{2}$ é o tempo de propagação médio. Estas equações são similares na forma para equações 14 e 15.

A segunda diretiva básica começa também das equações 10 e 11 pela definição

$$\Delta t = t_{21} - t_{12} \quad (\text{Eq. A18})$$

A substituição da equação 10 e 11 até a equação 18 produz, [7]

$$\Delta t = \frac{2 \cdot L \cdot \bar{v}_{ax} \cdot \cos \varphi}{c_o^2 - \bar{v}_{ax}^2 \cdot \cos^2 \varphi} \quad (\text{Eq. A19})$$

Agora, por causa $\cos \varphi \leq 1$ e assumindo [6] $\bar{v}_{ax}^2 \ll c_o^2$ a equação 19 é usualmente aproximada a

$$\Delta t \approx \frac{2 \cdot \bar{v}_{ax} \cdot L \cdot \cos \varphi}{c_o^2} \quad (\text{Eq. A20})$$

E resolvendo para \bar{v}_{ax} produz [A7]

$$\bar{v}_{ax} = \frac{\Delta t}{2 \cdot L \cdot \cos \varphi} \cdot c_o^2 \quad (\text{Eq. A21})$$

Este desenvolvimento requer conhecimento da velocidade do som, geometria da trajetória acústica, e diferença de tempo entre os tempos à jusante e à montante.

Todas estas derivações têm a suposição básica que \bar{v}_{ax} , c_0 e L são constantes em toda medição do fluxo. O efeito líquido destas suposições é produzir uma velocidade média espacialmente e temporalmente em toda medição de vazão. Estes desenvolvimentos não permitem variações na velocidade axial média e velocidade do som ao longo do percurso. Um problema adicional é a suposição da trajetória constante. Para entender a dispersão de dados observada na saída usual do medidor de vazão, é necessário derivar uma expressão mais geral não restrita por tais suposições. Em seguida, determinando-se a dispersão dos dados, a saída do medidor de vazão está dentro da dispersão esperada devido à ocorrência natural de turbulência no sistema de fluxo.

Tempo de trânsito levando em consideração a velocidade transversal

Levando em conta o efeito da velocidade transversal no processo de cálculo de velocidade axial média há um novo componente adicional na soma vetorial [A3], como mostrado na Figura 7.

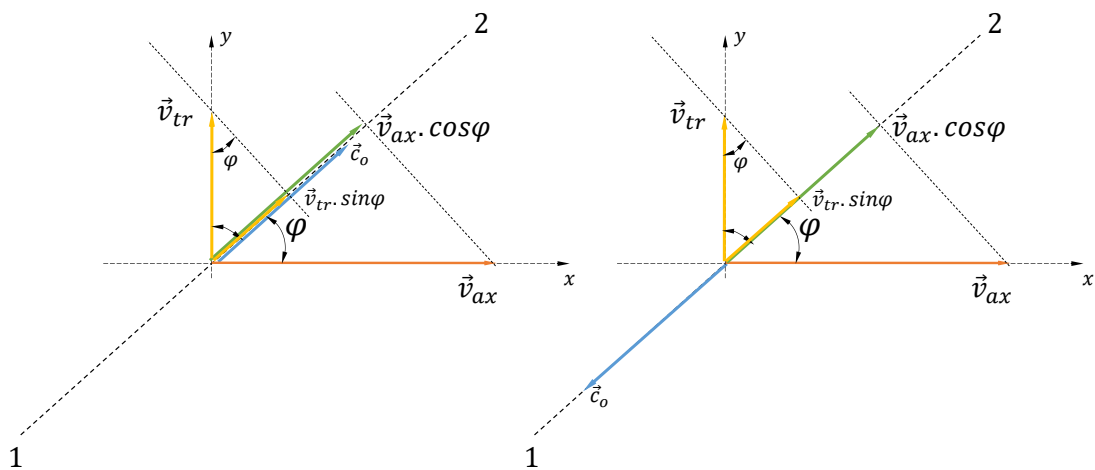


Figura 7. Representação vetorial de propagação de onda e fluxo com presença de velocidade transversal; a- Propagação à Jusante (Downstream); b- Propagação à Montante (Upstream)

assim, a soma vetorial é dado por

$$\vec{v} = \vec{c}_0 + \vec{v}_{ax} + \vec{v}_{tr} \quad (\text{Eq. A22})$$

Conseqüentemente, os valores da velocidade total para a jusante e montante resulta em

$$v = c_0 + \bar{v}_{ax} \cdot \cos \varphi + \bar{v}_{tr} \cdot \sin \varphi \quad (\text{Eq. A23})$$

$$v = c_0 - \bar{v}_{ax} \cdot \cos \varphi - \bar{v}_{tr} \cdot \sin \varphi \quad (\text{Eq. A24})$$

logo, os tempos são dados por

$$t_{12} = \frac{L}{c_0 + \bar{v}_{ax} \cdot \cos \varphi + \bar{v}_{tr} \cdot \sin \varphi} \quad (\text{Eq. A25})$$

$$t_{21} = \frac{L}{c_0 - \bar{v}_{ax} \cdot \cos \varphi - \bar{v}_{tr} \cdot \sin \varphi} \quad (\text{Eq. A26})$$

De uma maneira genérica a expressão do cálculo do tempo pode ser dada como

$$t = \frac{L}{c_0 + \varepsilon \cdot (\bar{v}_{ax} \cdot \cos \varphi + \gamma \cdot \bar{v}_{tr} \cdot \sin \varphi)} \quad (\text{Eq. A27})$$

onde

\bar{v}_{tr} é a componente transversal da velocidade de fluxo médio sobre a distância L

ε é o fator que +1 para transmissão a jusante e -1 a montante

γ é o fator igual a +1 e -1 dependendo da direção da componente transversal do fluxo paralelo a trajetória acústica e depende da orientação da trajetória acústica. Para dado componentes de fluxo transversal $\gamma = \pm$ para uma trajetória acústica no plano A e $\gamma = \mp$ para uma trajetória acústica no plano B

A velocidade axial média atravessando um caminho pode ser tomado como

$$\bar{v}_{ax} = -\gamma \cdot \bar{v}_{tr} \cdot \tan \varphi + \frac{L}{2 \cdot \cos \varphi} \left(\frac{1}{t_{12}} - \frac{1}{t_{21}} \right) \quad (\text{Eq. A28})$$

Quando dois planos acústicos são usados como mostrado na Figura 8 dispostos simetricamente em relação à linha central do conduto, e sempre duas velocidades encontram-se em uma camada média, então o erro devido à medição de tempos de trânsito causada pelo componente transversal do fluxo é eliminado como os termos $(-\gamma \cdot \bar{v}_{tr} \cdot \tan\varphi)$.

5. Cálculo de vazão para uma trajetória acústica

Para o cálculo de vazão de um medidor de vazão com uma trajetória acústica [A5], onde os transdutores formam uma trajetória cortando o diâmetro da tubulação, tem-se que a vazão volumétrica (Q) é determinada pela seguinte equação

$$Q = A \cdot \bar{v}_{ax}(D) \quad (\text{Eq. A29})$$

onde, A é a área do conduto fechado e $\bar{v}_{ax}(D)$ é a velocidade média axial no diâmetro do conduto.

Para determinar $\bar{v}_{ax}(D)$, velocidade média axial do fluido, através da seção transversal (A) e conseqüentemente a vazão, um fator de correção da distribuição de velocidades K_k deve ser conhecido [5], logo

$$K_k = \frac{1}{1.12 - 0.011 \cdot \log(\text{Re}_D)} \quad (\text{Eq. A30})$$

para um escoamento turbulento totalmente desenvolvido, e

$$K_k = 0.75 \quad (\text{Eq. A31})$$

para escoamento laminar.

Sendo que

$$K_k(\text{Re}_D) = \frac{\bar{v}_{ax}}{v(D)}, \quad (\text{Eq. A32})$$

onde, Re_D é o número de Reynolds e v é a velocidade média do fluido ao longo da trajetória acústica.

Reformulando Q tem-se que

$$Q = K_k \cdot A \cdot \bar{v}_{ax} \quad (\text{Eq. A33})$$

6. Cálculo de vazão para várias trajetórias acústicas

A medição de vazão por método ultrassônico de multi-trajetórias é um método estabelecido para medição de vazão com alta exatidão, especialmente para condutos fechados e canais retangulares [A8].

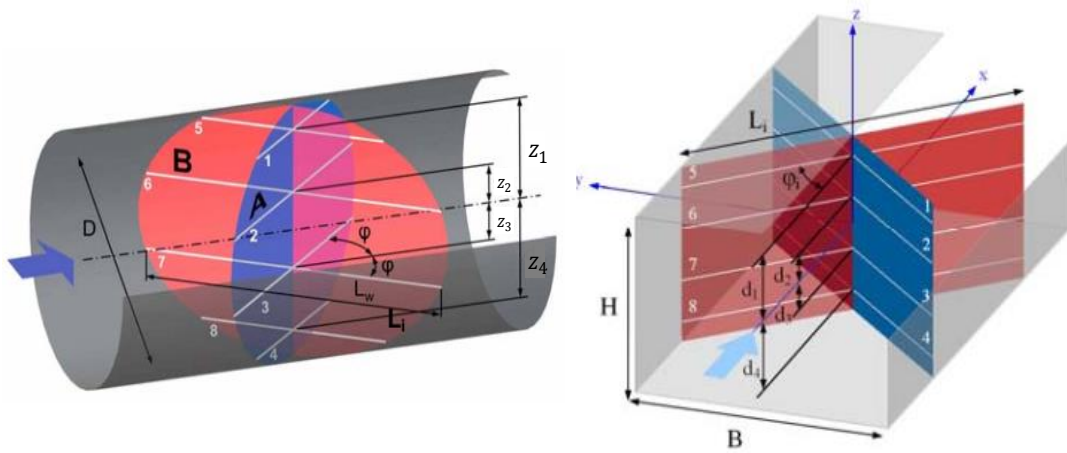


Figura 8. Seção de medição de vazão utilizando 4 trajetórias acústicas e dois planos em seções circulares e retangulares

A Figura 8 mostra uma típica aplicação de uma medição de um arranjo de dois planos cruzados e com cada plano contendo quatro trajetórias acústicas. Os dois planos cruzados compensam o efeito de fluxo transversal na seção de medição [A9]. A taxa de fluxo resultante Q é dado por

$$Q = \frac{Q_A + Q_B}{2}. \quad (\text{Eq. A34})$$

As velocidades médias são medidas em cada trajetória acústica. Estas velocidades são influenciadas pelo distúrbio do fluxo no local e possível fluxo transversal na seção de medição [A10]. O volume de fluxo em toda seção transversal é estimado pela média e a ponderação das leituras das trajetórias individuais. A precisão do método aumenta com grandes diâmetros e altas velocidades. As variações na precisão dos métodos de integração dependem do número de trajetórias assumidas para os casos de distribuições de velocidade ideais e perturbados [A11]. Além disso, o foco recai sobre a influência de

imprecisões de posições do transdutor e sobre maneiras de eliminar essas influências negativas sobre a determinação do fluxo de volume.

Os métodos de integração são fatores que influenciam nos erros de estimação de vazão. A versão da norma IEC41 (1991) [A3] exemplifica dois métodos de integração: Gauss-Legendre (seções retangulares) e Gauss-Jacobi (seções Circulares). Contudo, novos métodos de integração vêm sendo estudados [A12], destacando o chamado OWICS (*Optimal Weighted Integration for Circular Sections*) e OWIRS (*Optimal Weighted Integration for Rectangular Sections*), usados em seções circulares e retangulares respectivamente, [A12]. A norma IEC41 vem passando por uma revisão e estes novos métodos estão sendo anexados a norma com um método válido de integração numérica.

Os métodos de integração recentemente desenvolvidos como OWICS e OWIRS são recomendados em certas situações. Os métodos OWICS/OWIRS são aconselhados para os perfis completamente desenvolvidos em 10D ou mais distantes de quaisquer perturbações a montante, enquanto que, para perfis de velocidade perto de uma perturbação a montante, a escolha entre os métodos Gauss-Jacobi/Legendre ou OWICS/OWIRS tem que ser feito de caso a caso [A12].

A norma IEC41 aborda o uso de várias trajetórias acústicas e a mais utilizada consiste na configuração da Figura 8. Os resultados de simulações utilizando Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) ajudam a justificar a utilização da configuração de dois planos cruzados e a escolha do método de integração e os coeficientes. Em alguns casos, principalmente os que envolvem grandes diâmetros, o uso de mais trajetórias acústicas é utilizado para que tenha um menor erro na medição e alcançar o nível de incerteza descrito por norma. As simulações numéricas são usadas para ter uma ideia sobre o campo de fluxo e, portanto, favorecer a escolha de localizações de transdutor, métodos de integração, o número de trajetórias e fatores de ponderação. Em todas as situações de todas as partes envolvidas têm que concordar com o número de trajetórias e o método de integração.

As seções seguintes discutem a teoria da medição de vazão utilizando várias trajetórias acústicas.

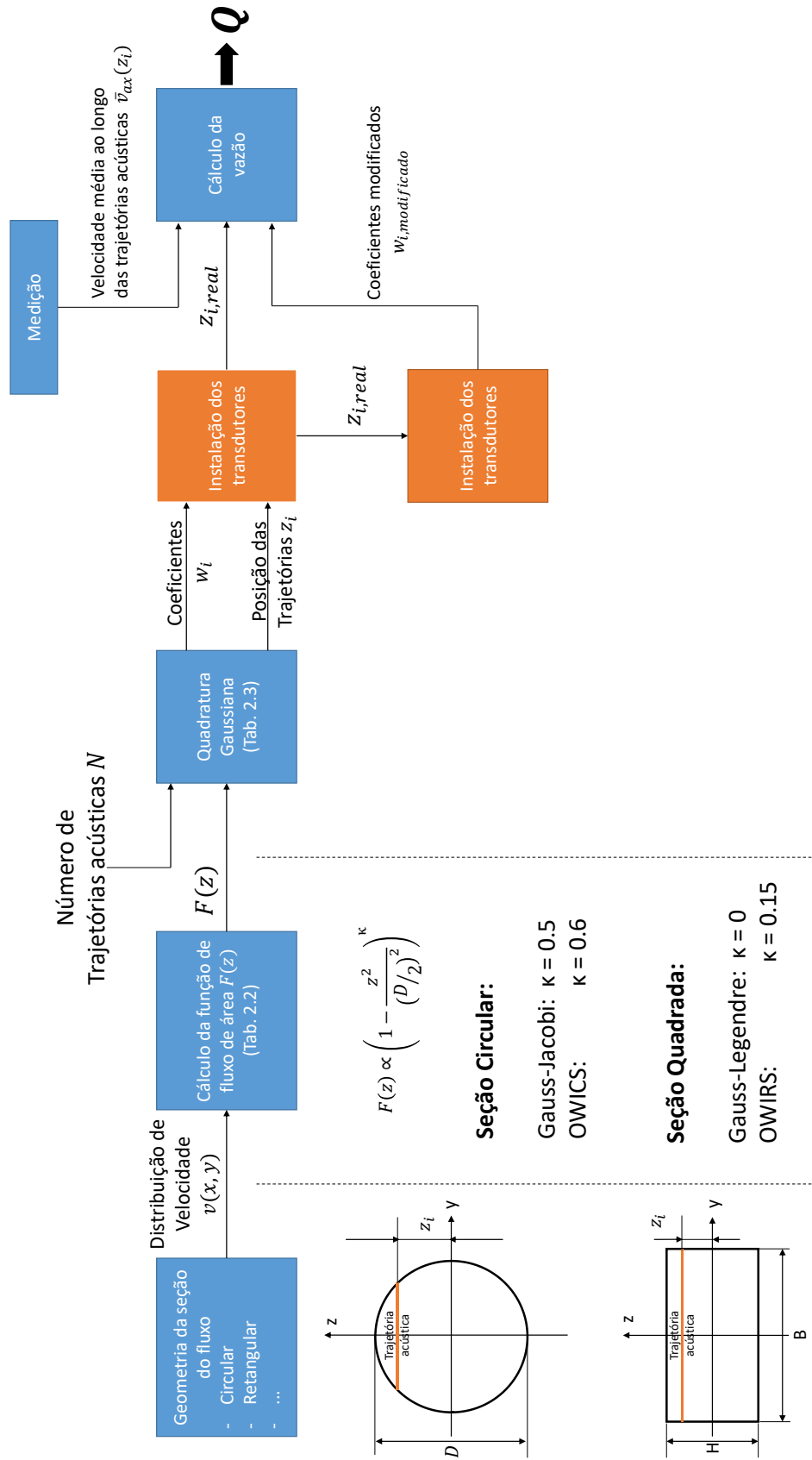


Figura 9. Diagrama de bloco de cálculo de vazão (retirado de [A11])

7. Teoria de integração numérica

Esta seção relata o cálculo de medição de vazão numérica. A Figura 9 mostra o diagrama de bloco com todos os passos requisitados para os cálculos da vazão.

7.1. Função de Fluxo de área

A ideia básica da integração do volume do fluxo [A13] é reconstruir, em um primeiro passo, a velocidade de distribuição na seção cruzada do fluxo na base de medição, as velocidades médias locais em um plano acústico, como a velocidade média da trajetória $\bar{v}_{ax,1}, \bar{v}_{ax,2}, \dots, \bar{v}_{ax,i}$ no arranjo escolhido e em um segundo passo a distribuição é integrada. Numericamente a taxa do fluxo Q pode ser aproximada pela soma das taxas de fluxo parciais ΔQ para cada faixa horizontal, como mostrado na Figura 10,

$$Q = \sum_{i=1}^N \Delta Q_i = \sum_{i=1}^N \bar{v}_{ax,i} \cdot A_i = \sum_{i=1}^N \bar{v}_{ax,i} \cdot l_i \cdot \Delta z \quad (\text{Eq. A35})$$

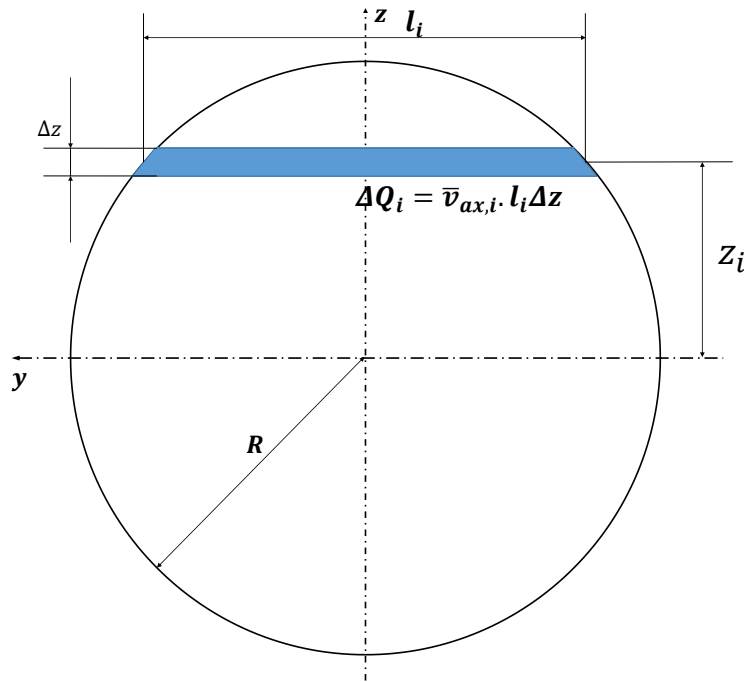


Figura 10. Integração por soma das taxas de fluxo parcial

Em cada altura z , uma velocidade média axial $\bar{v}_{ax}(z_i)$ é obtida via o método de medição ultrassônico. A função de fluxo de área $F(z)$ na altura z é definida como o produto entre a velocidade média axial $\bar{v}_{ax}(z_i)$ e o comprimento da corda $b(z_i)$ na altura z_i . Para uma trajetória localizada em uma altura z arbitrária, $F(z)$ pode ser escrito como

$$F(z) = \bar{v}_{ax}(z)b(z) \quad (\text{Eq. A36})$$

onde $b(z)$ é dado por

$$b(z) = L_i \cdot \text{sen}(\varphi_i) = l_i \quad (\text{Eq. A37})$$

A função de fluxo de área $F(z)$ descreve a distribuição da taxa de fluxo parcial e é expressado por

$$Q = \int_{-D/2}^{D/2} F(z) \cdot dz = \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{i=0}^N \Delta Q_i \quad (\text{Eq. A38})$$

Em um contexto teórico, a equação 38 é perfeita para se determinar a vazão. Porém, em casos práticos, para satisfazer a integral da equação, infinitas trajetórias acústicas deveriam ser colocadas no conduto para se medir a vazão. Na prática, apenas um número finito (N) de trajetórias são utilizadas. Então, a integral é aproximada a uma soma ponderada de dada função de fluxo de área real F_{real} em certa altura z_i . A função de fluxo de área real F_{real} é então conhecida em N posições, onde as velocidades médias axiais são medidas [3]. A função de fluxo de área $F_{real}(z)$ é suposta ser até um certo termo residual $R(z)$ para a assumida função de fluxo de área $F(z)$

$$F_{real}(z) = F(z)R(z) \quad (\text{Eq. A39})$$

A vazão real pode então ser aproximada como o seguinte

$$Q_{real} = \int_{-D/2}^{D/2} F_{real}(z) dz = \int_{-D/2}^{D/2} F(z) \cdot R(z) dz \cong k \frac{D}{2} \sum_{i=1}^N w_i F_{real}(z_i) = k \frac{D}{2} \sum_{i=1}^N w_i b(z_i) \bar{v}_{ax}(z_i) \quad (\text{Eq. A40})$$

sendo

$$b(z_i) = L_i \cdot \sin \varphi = D \cdot \sin \alpha_i \quad (\text{seções circulares}) \quad (\text{Eq. A41})$$

$$b(z_i) = L_i \cdot \sin \varphi = B \quad (\text{seções retangulares}) \quad (\text{Eq. A42})$$

onde

L_i é o comprimento da trajetória acústica na trajetória i

φ ângulo da trajetória acústica

D é o diâmetro do conduto

B é a dimensão do conduto para seções retangulares

w_i são coeficientes de ponderação dependendo do número de caminhos e da técnica de integração usada

$\bar{v}_{ax}(z_i)$ é a velocidade média axial do fluxo ao longo da trajetória i

N quantidade de trajetórias acústicas em um plano de medida

k coeficiente de correção

O fator de correção k só é relevante para o Gauss-Jacobi (GJ) e o método de Gauss-Legendre (GL) e é desigual 1, se o GL é usado para seção circular e o método GJ para seção retangular. k é dependente do número de trajetórias num dos planos. As fórmulas gerais são os seguintes:

$$k_{GL,N} = \frac{\sum_{i=1}^N w_{i,GJ} \cdot \sqrt{1-d_{i,GJ}^2}}{\sum_{i=1}^N w_{i,GL} \cdot \sqrt{1-d_{i,GL}^2}} \quad k_{GJ,N} = \frac{\sum_{i=1}^N w_{i,GL}}{\sum_{i=1}^N w_{i,GJ}} \quad (\text{Eq. A43})$$

Na *Tabela 1* diferentes funções de fluxo de área são resumidas o qual corresponde para os quatro casos:

- 1-) Seções circulares Gauss-Jacobi (IEC 60041)
- 2-) Seções circulares OWICS (Seções circulares para coeficientes otimizados)
- 3-) Seções retangulares Gauss-Legendre (IEC 60041)
- 4-) Seções retangulares OWIRS (Seções retangulares para coeficientes otimizados)

Outros formatos de seções transversais como elípticos poderiam ser também considerados.

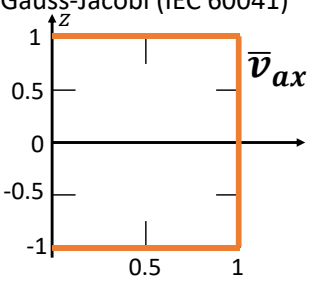
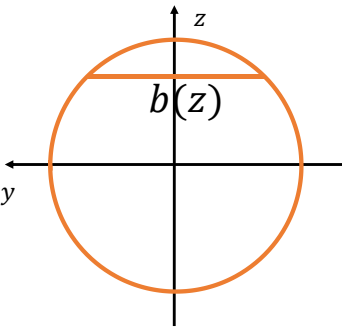
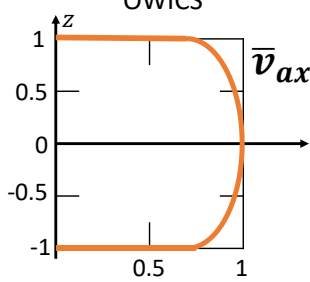
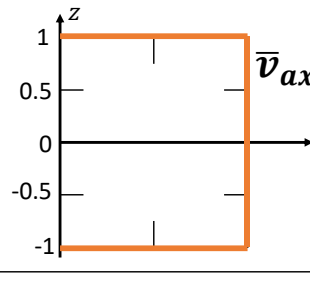
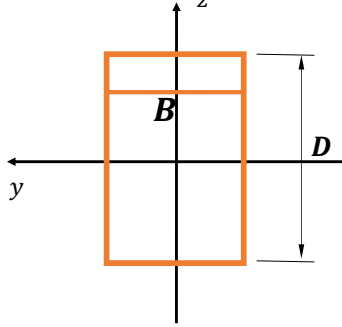
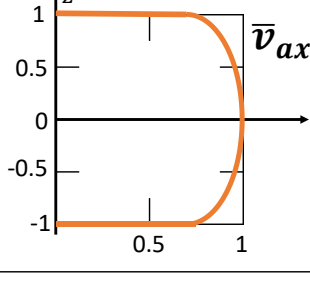
Seção Circular		
<p>Gauss-Jacobi (IEC 60041)</p>  <p>\bar{v}_{ax}</p>	 <p>$b(z)$</p>	<p>OWICS</p>  <p>\bar{v}_{ax}</p>
$F(z) = \bar{v}_{ax} \cdot b(z)$ $F(z) = \bar{v}_{ax} \cdot D \cdot \left(1 - \frac{z^2}{(D/2)^2}\right)^{0.5}$		$F(z) = \bar{v}_{ax} \cdot b(z)$ $F(z) = v_{max} \cdot D \cdot \left(1 - \frac{z^2}{(D/2)^2}\right)^{0.6}$
Seção Retangular		
<p>Gauss-Legendre (IEC 60041)</p>  <p>\bar{v}_{ax}</p>	 <p>B</p> <p>D</p>	<p>OWIRS</p>  <p>\bar{v}_{ax}</p>
$F(z) = \bar{v}_{ax} \cdot B$ $F(z) = \bar{v}_{ax} \cdot B \cdot \left(1 - \frac{z^2}{(D/2)^2}\right)^0$		$F(z) = \bar{v}_{ax} \cdot B$ $F(z) = v_{max} \cdot B \cdot \left(1 - \frac{z^2}{(D/2)^2}\right)^{0.15}$

Tabela 1. Resumo da função de fluxo de área para seções circulares e retangulares (Retirado de [A11])

Como um resultado das considerações anteriores, as diferentes funções de fluxo de área podem ser escritas geralmente como

$$F(z, \kappa) \propto \left(1 - \frac{z^2}{(D/2)^2}\right)^\kappa \quad (\text{Eq. A44})$$

Com os seguintes valores para o parâmetro κ :

Gauss-Jacobi: $\kappa = 0.5$

OWICS: $\kappa = 0.6$

Gauss-Legendre: $\kappa = 0$

OWIRS: $\kappa = 0.15$

7.2. Cálculos das posições e coeficientes

Para um dado número de trajetórias N o método de integração por Quadratura Gaussiana [A14] dados z_i e w_i tais como o erro entre a vazão real Q_{real} e suas aproximações usando apenas velocidades axiais medidas é minimizada. A teoria que a aproximação da integração é perfeita para o termo do erro $e(z)$ que pode ser representado pelos polinômios até o grau $2N - 1$. Isto significa que para incrementar o número de trajetórias mais perfis perturbados representados por alta ordem polinomial pode ser integrado sem erro.

O procedimento detalhado de como calcular as posições e os coeficientes são mostrados abaixo pelo conjunto de fórmulas. $F(z)$ corresponde para a funções de coeficientes $W(z)$ como foi introduzido em Preuss [A15]. O fator sobre esta teoria é que permanece para algumas diferentes características de funções $F(z)$ tão longo quanto a integral da equação 48 pode ser avaliado.

Cálculos das posições das trajetórias

$$p_{-1} = 0$$

$$p_0 = 1$$

$$p_{j+1} = (z - a_j) \cdot p_j(z) - b_j \cdot p_{j-1}(z) \quad (j = 0, 1, \dots, N - 1) \quad (\text{Eq. A45})$$

onde

$$a_j = \frac{\int_a^b F(z) \cdot z \cdot p_j^2(z) \cdot dz}{\int_a^b F(z) \cdot p_j^2(z) \cdot dz} \quad (\text{Eq. A46})$$

$$b_j = \frac{\int_a^b F(z) \cdot p_j^2(z) \cdot dz}{\int_a^b F(z) \cdot p_{j-1}^2(z) \cdot dz} \quad (j = 1, 2, \dots, N) \quad (\text{Eq. A47})$$

As posições das trajetórias z_1, z_2, \dots, z_N de integração numéricas de $N - pontos$ são iguais para as raízes (zeros) do polinômios $p_N(z)$ gerados pela recorrência.

Cálculos dos coeficientes

$$w_j = \frac{1}{F(z_j)} \int_a^b F(z) \mathcal{L}_j(z) dz \quad (j = 1, 2, \dots, N) \quad (\text{Eq. A48})$$

onde \mathcal{L}_j é o j – ésimo do Polinômio de Lagrange:

$$\mathcal{L}_j(z) = \prod_{\substack{k=0 \\ k \neq j}} \frac{z - z_k}{z_j - z_k} \quad (\text{Eq. A49})$$

Com as posições das trajetórias z_1, z_2, \dots, z_N

Nestes cálculos $F(z)$ é a função de fluxo de área assumida.

A lista completa de todos os relevantes casos é mostrada na Tabela 2. Como o número de trajetórias é um parâmetro projetado dependente na dificuldade das condições hidráulicas na medição da seção transversal, a lista inclui todos os arranjos até 9 trajetórias (ou 18 trajetórias cruzadas).

N	Gauss-Jacobi		OWICS		Gauss-Legendre		OWIRS	
	Posição $z_i / (D/2)$	Coefficientes w_i	Posição $z_i / (D/2)$	Coefficientes w_i	Posição $z_i / (D/2)$	Coefficientes w_i	Posição $z_i / (D/2)$	Coefficientes w_i
1	0	1.570796	0	1.513365	0	2	0	1.837286
2	± 0.500000	0.906900	± 0.487950	0.890786	± 0.577350	1	± 0.550482	0.969761
3	0	0.785398	0	0.768693	0	0.888889	0	0.853688
	± 0.707107	0.555360	± 0.695608	0.553707	± 0.774597	0.555556	± 0.752355	0.557403
4	± 0.309017	0.597566	± 0.303783	0.588228	± 0.339981	0.652145	± 0.329729	0.634200
	± 0.809017	0.369316	± 0.799639	0.371884	± 0.861136	0.347855	± 0.844510	0.356143
5	0	0.523599	0	0.515768	0	0.568889	0	0.554092
	± 0.500000	0.453450	± 0.493266	0.448857	± 0.538469	0.478629	± 0.525989	0.470657
	± 0.866025	0.261799	± 0.858534	0.265433	± 0.906180	0.236927	± 0.893646	0.245772
6	± 0.222521	0.437547	± 0.219676	0.432160	± 0.238619	0.467914	± 0.233427	0.458140
	± 0.623490	0.350885	± 0.616712	0.348913	± 0.661209	0.360762	± 0.649158	0.357811
	± 0.900969	0.194727	± 0.894939	0.198413	± 0.932470	0.171324	± 0.922789	0.179346

7	0	0.392699	0	0.388174	0	0.417959	0	0.409876
	±0.382683	0.362807	±0.378515	0.359341	±0.405845	0.381830	±0.398454	0.375801
	±0.707107	0.277680	±0.700797	0.277122	±0.741531	0.279705	±0.730661	0.279255
	±0.923880	0.150279	±0.918958	0.153701	±0.949108	0.129485	±0.941444	0.136455
8	±0.173648	0.343763	±0.171873	0.340324	±0.183435	0.180326	±0.180326	0.356680
	±0.500000	0.302300	±0.495335	0.300163	±0.525532	0.517455	±0.517455	0.310151
	±0.766044	0.224375	±0.760344	0.224578	±0.796666	0.787089	±0.787085	0.223172
	±0.939693	0.119388	±0.935615	0.122463	±0.960290	0.954089	±0.954089	0.107221
9	0	0.314159	0	0.311216	0	0	0	0.325159
	±0.309017	0.298783	±0.306222	0.296281	±0.324253	0.319446	±0.319446	0.308080
	±0.587785	0.254160	±0.583053	0.252911	±0.613371	0.605335	±0.605335	0.258640
	±0.809017	0.184658	±0.803925	0.185265	±0.836031	0.827640	±0.827640	0.182040
	±0.951057	0.097081	±0.947631	0.099815	±0.968160	0.963048	±0.963048	0.086431

Tabela 2. Posições e Coeficientes de ponderação para vários tipos de configuração (Retirado de [A13])

7.3. Posições das trajetórias não ideais

Para posições das trajetórias não ideais Voser [A12] tem dado fórmulas para as correções dos coeficientes para configuração de quatro trajetórias acústicas em uma seção circular.

É mostrado aqui que as formulas de correções para os coeficientes podem ser gerados das equações 48 e 49 em um modo genérico para seções transversais arbitrárias (circular, retangular, elípticos, ...) e números de trajetórias N .

7.3.1 Formulas de correções para os coeficientes

De acordo com equação 48 os coeficientes de integração são calculados com a formula

$$w_i = \frac{1}{\left(1 - \frac{4z_i^2}{D^2}\right)^\kappa} \cdot \frac{2}{D} \cdot \int_{-D/2}^{D/2} \left(1 - \frac{4z_i^2}{D^2}\right)^\kappa \cdot \mathcal{L}_i(z) \cdot dz \quad (\text{Eq. 50})$$

onde

z_i : As posições atuais das trajetórias acústicas instaladas ($i = 1, \dots, N$) com

$$-\frac{D}{2} < z_i < \frac{D}{2}$$

D : Diâmetros de uma seção circular / Altura da seção retangular

κ : Parâmetro dependente no modelo de integração

Seção circular: Gauss-Jacobi $\kappa = 0.5$, OWICS $\kappa = 0.6$

Seções retangulares: Gauss-Legendre $\kappa = 0$, OWIRS $\kappa = 0.1$

\mathcal{L}_i : Os Polinômios de Lagrange dado por

$$\mathcal{L}_i(z) = \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^N \frac{z - z_k}{z_i - z_k} \quad (\text{Eq. A51})$$

Por razões de simplificação substitui-se:

$$z_i = x_i \cdot \frac{D}{2} \quad (-1 < z_i < 1) \quad (\text{Eq. A52})$$

Substituindo na equação 3.1

$$w_i = \frac{1}{(1 - x_i^2)^\kappa} \int_{-1}^1 (1 - x)^\kappa \cdot \mathcal{L}_i \cdot dx \quad (\text{Eq. A53})$$

Na seguinte, a integração 53 é avaliada para 2,3,...,6 trajetórias acústicas e é descrito em [A12]. Adicionalmente é mostrado, que a campo de integração avaliada uma fórmula de correção para uma posição de trajetórias não ideais z_i .

7.3.2 Instalação para 4 trajetórias

$$w_i = - \frac{g_2(\kappa) \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^4 x_k + g_1(\kappa) \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^4 x_k}{(1 - x_i^2)^\kappa \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^4 (x_i - x_k)} \quad (i = 1, \dots, 4) \quad (\text{Eq. A54})$$

$$w_1 = - \frac{g_2(\kappa)(x_2 + x_3 + x_4) + g_1(\kappa) \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4}{(1 - x_1^2)^\kappa (x_1 - x_2)(x_1 - x_3)(x_1 - x_4)} \quad w_2 = - \frac{g_2(\kappa)(x_1 + x_3 + x_4) + g_1(\kappa) \cdot x_1 \cdot x_3 \cdot x_4}{(1 - x_2^2)^\kappa (x_2 - x_1)(x_2 - x_3)(x_2 - x_4)}$$

$$w_3 = - \frac{g_2(\kappa)(x_1 + x_2 + x_4) + g_1(\kappa) \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_4}{(1 - x_3^2)^\kappa (x_3 - x_1)(x_3 - x_2)(x_3 - x_4)} \quad w_4 = - \frac{g_2(\kappa)(x_1 + x_2 + x_3) + g_1(\kappa) \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3}{(1 - x_4^2)^\kappa (x_4 - x_1)(x_4 - x_2)(x_4 - x_3)}$$

(Eq. A55)

Substituindo

$$w_1 = \frac{g_2(\kappa) \cdot D^2 / 4(z_3 + z_4 - z_2) - g_1(\kappa) \cdot z_2 \cdot z_3 \cdot z_4}{(1 - 4z_1^2 / D^2)^\kappa (z_1 - z_2)(z_1 + z_3)(z_1 + z_4)}$$

$$w_2 = \frac{g_2(\kappa) \cdot D^2 / 4(z_3 + z_4 - z_1) - g_1(\kappa) \cdot z_1 \cdot z_3 \cdot z_4}{(1 - 4z_2^2 / D^2)^\kappa (z_2 - z_1)(z_2 + z_3)(z_2 + z_4)}$$

$$w_3 = \frac{g_2(\kappa) \cdot D^2 / 4(z_1 + z_2 - z_4) - g_1(\kappa) \cdot z_1 \cdot z_2 \cdot z_4}{(1 - 4z_3^2 / D^2)^\kappa (z_1 + z_3)(z_2 + z_3)(z_3 - z_4)}$$

$$w_4 = \frac{g_2(\kappa) \cdot D^2 / 4(z_1 + z_2 - z_3) - g_1(\kappa) \cdot z_1 \cdot z_2 \cdot z_3}{(1 - 4z_4^2 / D^2)^\kappa (z_1 + z_4)(z_2 + z_4)(z_4 - z_3)}$$

(Eq. A56)

	Seção Circular		Seção Retangular	
	Gauss-Jacobi $\kappa = 0.5$	OWICS $\kappa = 0.6$	Gauss-Legendre $\kappa = 0$	OWIRS $\kappa = 0.15$
$g_1(\kappa)$	1.570796	1.513365	2	1.837286
$g_2(\kappa)$	0.392699	0.360325	2/3	0.556753
$g_3(\kappa)$	0.196350	0.174351	2/5	0.315143

Tabela 3. Resumo das constantes de integração para as fórmulas de correções

O cálculo é baseado na integral

$$g_i(\kappa) = \int_{-1}^1 (1 - x^2)^\kappa \cdot x^{2(i-1)} dx \quad (i = 1, 2, 3, \dots) \quad (\text{Eq. A57})$$

8. Referência Bibliográfica

- [A1] W. R. Brody e J. D. Meindl, "Theoretical Analysis of the CW Doppler Ultrasonic Flowmeter," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 21, nº 3, 1974.
- [A2] M. S. Beck, "Correlation in instruments: cross-correlation flowmeters," *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, vol. 14, 1981.
- [A3] *IEC 60041 ; Corrigendum 1 - Field acceptance tests to determine the hydraulic performance of hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines, ed 3, 1996.*
- [A4] F. J. Weber, "Ultrasonic Beam Propagation in Turbulent Flow," *These of Doctor of Philosophy in Mechanical Engineering - Worcester Polytechnic Institute*, p. 168, 16 December 2003.
- [A5] *ABNT/ISO 12765 , Medição De Vazão De Fluidos Em Conduitos Fechados - Métodos Usando Medidor De Vazão Ultrassônico Por Tempo De Trânsito, ABNT, 2010.*
- [A6] B. Lipkens e D. T. Blackstock, "Model Experiment to Study Sonic Boom Propagation Through Turbulence. Part II. Effect of turbulence Intensity and Propagation Distance Through Turbulence," *Journal of Acoustical Society of America*, vol. 104, nº 3, pp. 1301-1309, september 1998.
- [A7] F. C. Lowell Jr., "The Design of Open Channel Acoustic Flowmeters for Specified Accuracy: Sources and Calibration Test Results," *National Bureau of Standards Special Publication 484, Proceedings of the Symposium on Flow in Open Channels and Closed Conduits held at NBS*, vol. 1, nº 1, pp. 243-266, february 1977.
- [A8] S. Marushchenko e P. Gruber, "Comparative study of 4(8)-PATH and 5(10)-Path configurations for ATT flow measurements in circular conduits," *Hidro&Hydro - PCH Notícias & SHP News*, vol. 15, nº 62, pp. 8-15, jul 2014.
- [A9] T. Tresch, P. Gruber e T. Staubli, "Comparision of Integration methods for multipath acoustic discharge measurements," em *6 International Conference on Innovation in Hydraulic Efficiency Measurements*, Portland, Oregon, USA, 2006.

- [A10] S. Hug, T. Staubli e P. Gruber, "Comparison of measured path velocities with numerical simulations for heavily disturbed velocity distributions," em *9th IGHEM - International Group for Hydraulic Efficiency Measurement*, Trondheim-Norway, 2012.
- [A11] T. Tresch, B. Lüscher, T. Staubli e P. Gruber, "Presentation of optimized integration methods and weighting corrections for the acoustic discharge measurement," em *7th IGHEM-International Group for Hydraulic Efficiency Measurement*, Milano-Italy, 2008.
- [A12] A. Voser, "Analyse und Fehleroptimierung der mehrpfadigen akustischen Durchflussmessung in Wasserkraftanlagen," *ETH Zürich*, 1999.
- [A13] T. Tresch, P. Gruber e T. Staubli, "Comparison of integration methods for multipath acoustic discharge measurements," em *6th IGHEM - International Group for Hydraulic Efficiency Measurement*, Portland-USA, 2006.
- [A14] T. Petrut, C. Ioana, A. Anghel, I. Candel e G. Vasile, "Flow rate computation of highly turbulent pipe flows using wide-band signals and matched filter-based approach in ultrasonic multi-element configuration," *Hidro&Hydro - PCH Notícias & Ship News*, vol. 63, pp. 8-12, out/dez 2014.
- [A15] S. A. Preuss, W. T. Teukolsky e B. P. Flannery, *Numerical Recipes in C*, Cambridge: Cambridge University Press, 1995.

Anexo I

Figuras referentes aos Tempos de Trânsito estimados durante o experimento em Laboratório. As informações contidas já estão com tratamento de *Outliers*.

Medição 1

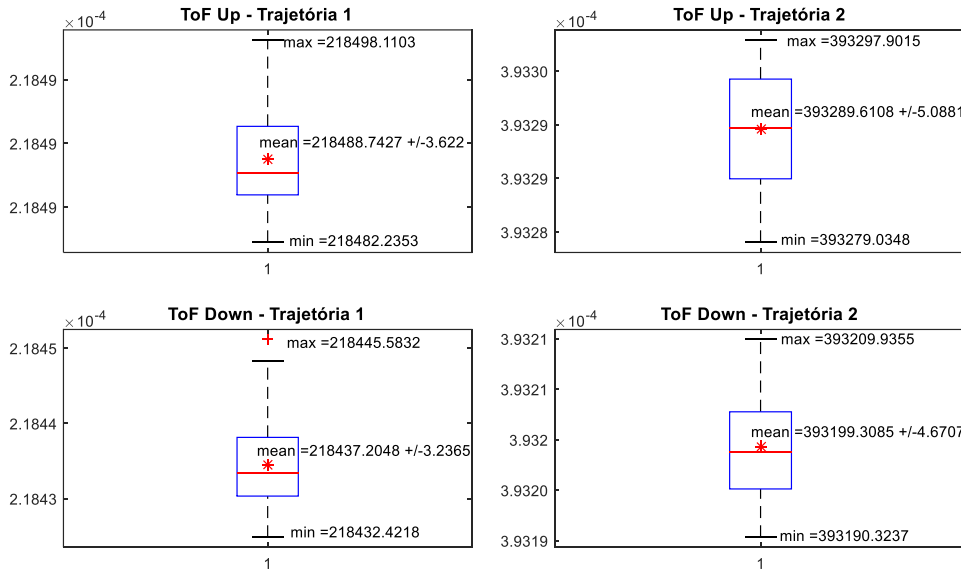


Figura I. 1. Tempos de Trânsito das Trajetórias 1 e 2 com tratamento de Outliers

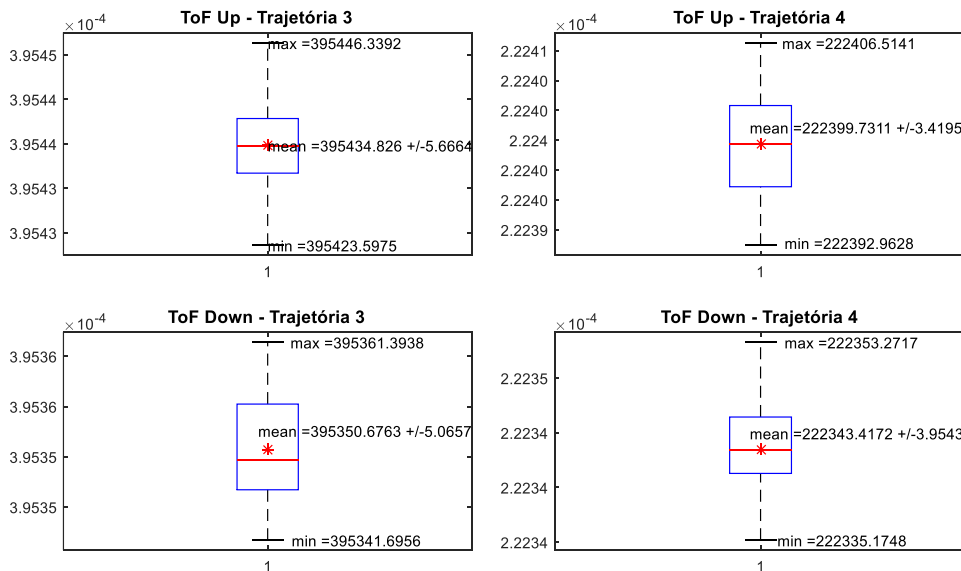


Figura I. 2. Tempos de Trânsito das Trajetórias 3 e 4 com tratamento de Outliers

Medição 2

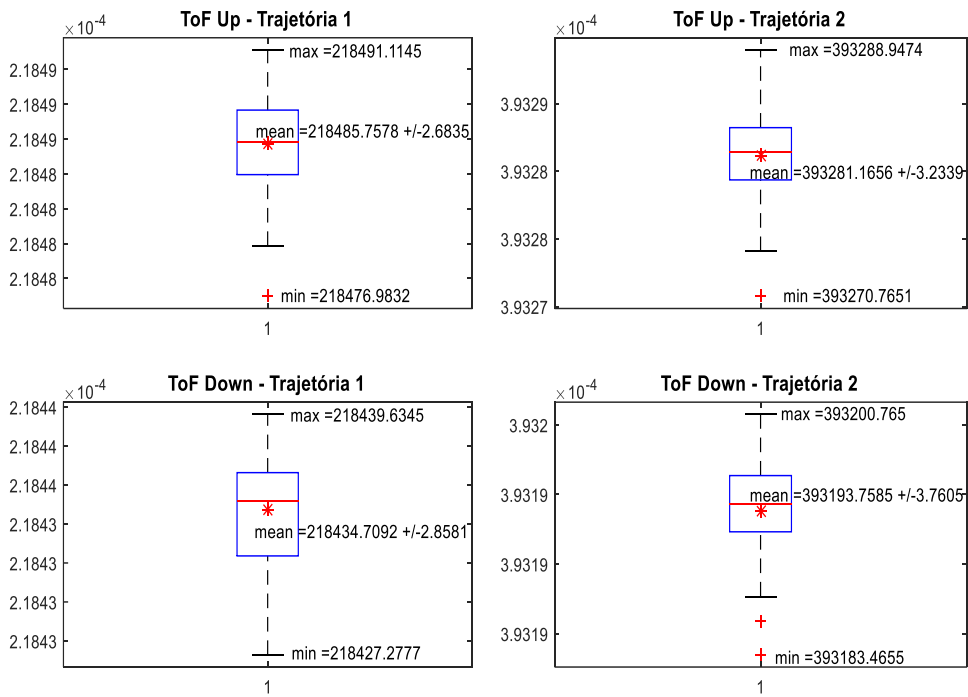


Figura I. 3. Tempos de Trânsito das Trajetórias 1 e 2 com tratamento de Outliers

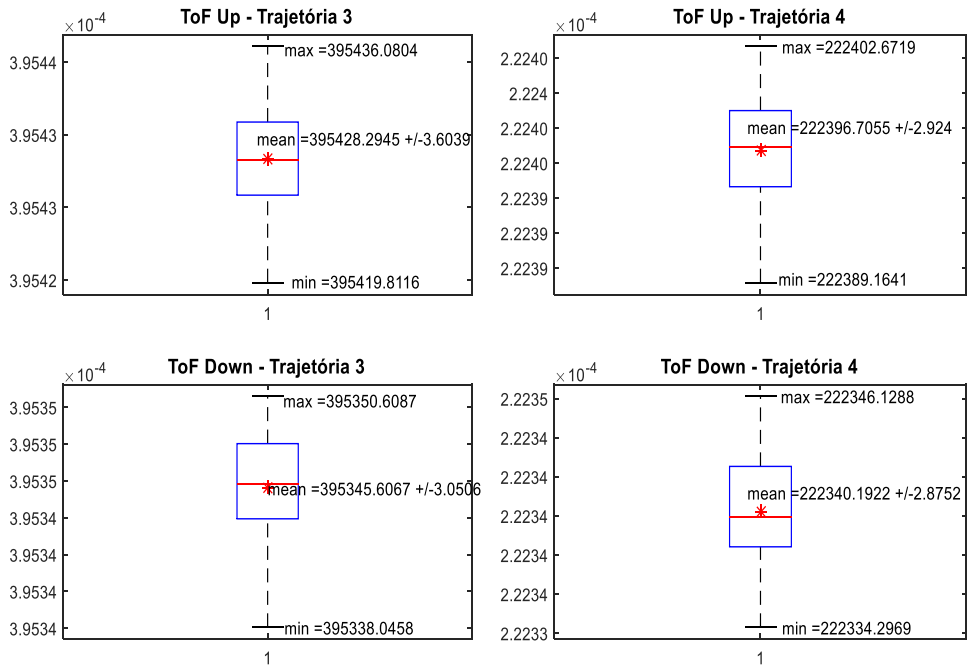


Figura I. 4. Tempos de Trânsito das Trajetórias 3 e 4 com tratamento de Outliers

Medição 3

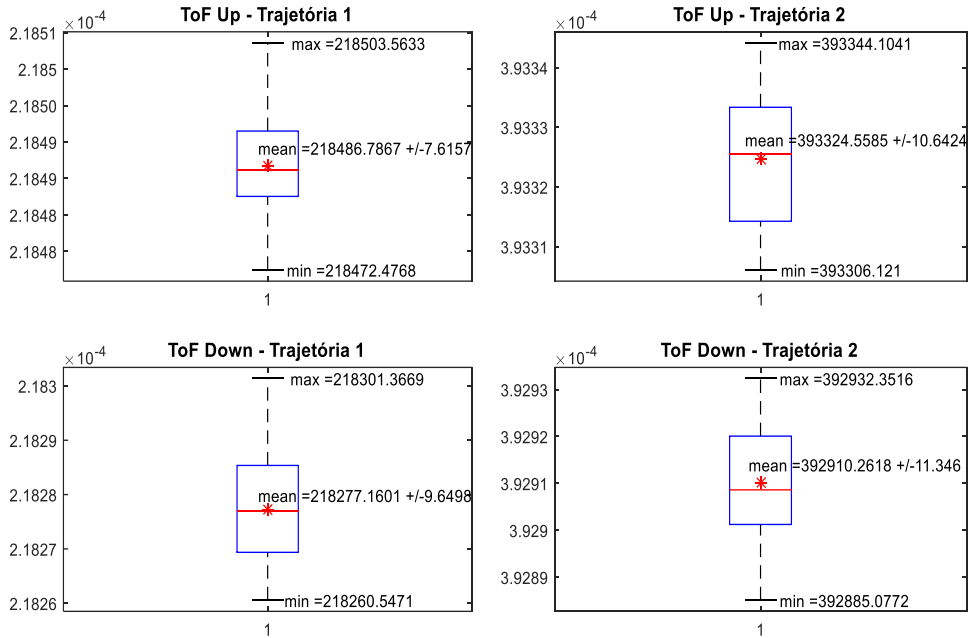


Figura I. 5. Tempos de Trânsito das Trajetórias 1 e 2 com tratamento de Outliers

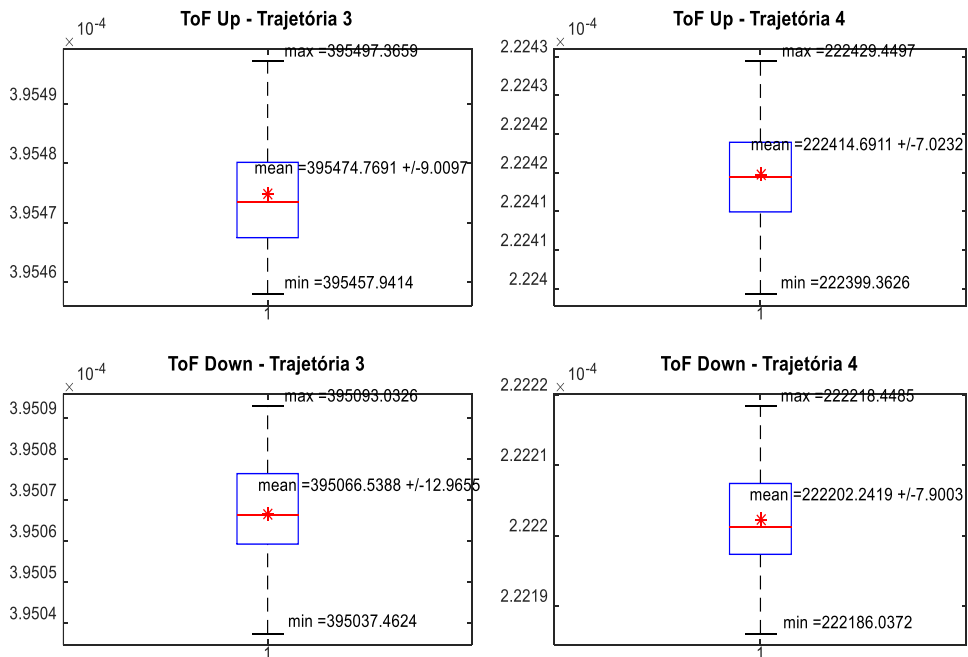


Figura I. 6. Tempos de Trânsito das Trajetórias 3 e 4 com tratamento de Outliers

Medição 4

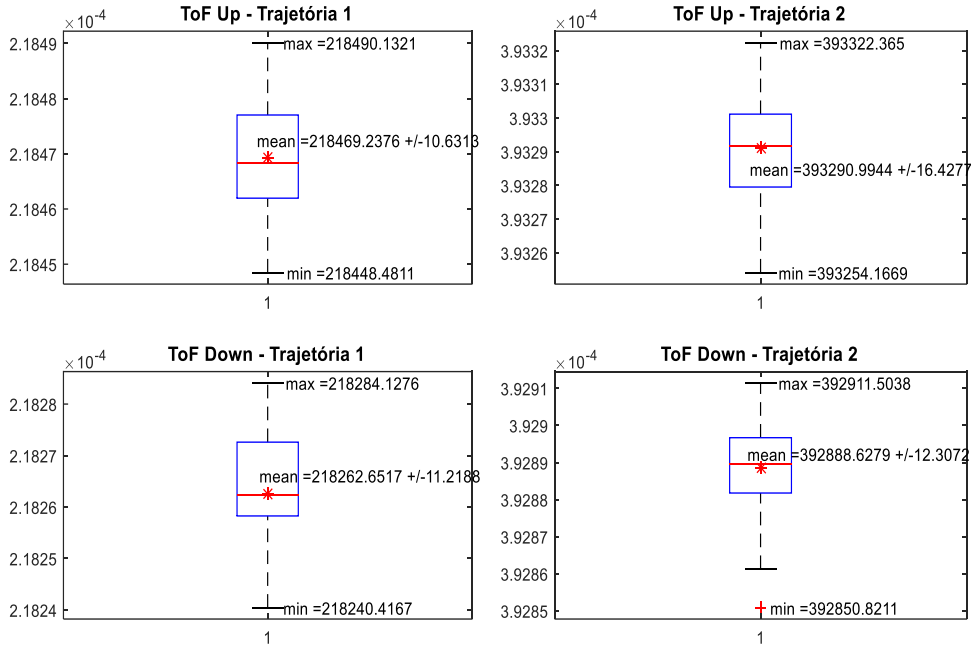


Figura I. 7. Tempos de Trânsito das Trajetórias 1 e 2 com tratamento de Outliers

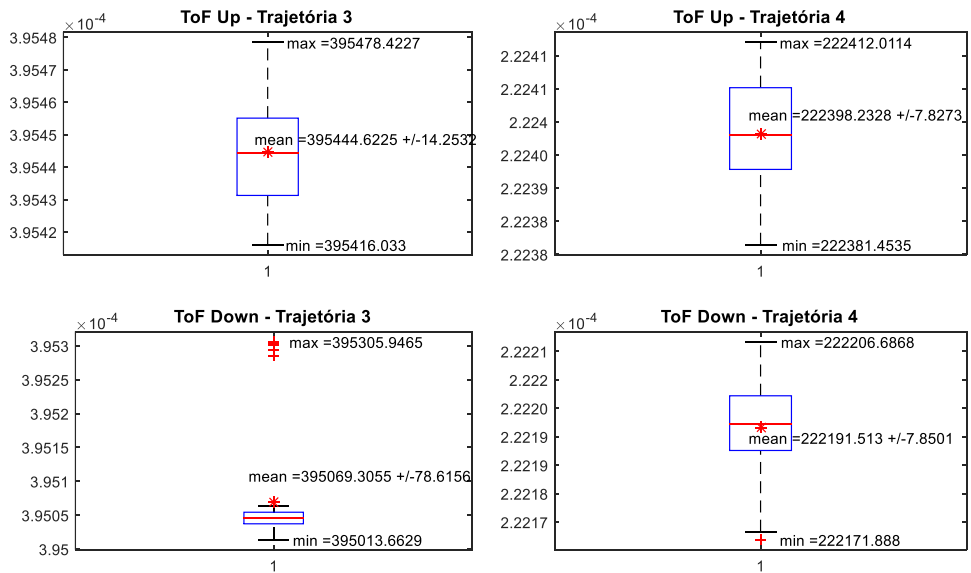


Figura I. 8. Tempos de Trânsito das Trajetórias 3 e 4 com tratamento de Outliers

Anexo II - DESENVOLVIMENTO DE UM MEDIDOR DE VAZÃO ULTRASSÔNICO DE MULTI-TRAJETÓRIAS POR TEMPO DE TRÂNSITO

^{1,2}Mateus Mendes Campos
(mateus@institutognarus.com.br)

¹Luiz Eduardo Borges da Silva
(leborges@unifei.edu.br)

^{1,2}Carlos Eduardo Teixeira
(carlos.teixeira@institutognarus.com.br)

³Gustavo Ferreira de Souza
(gustavo@rennosonic.com)

³Vitor Raimundo Maia Pamplona
(vitor@rennosonic.com)

RESUMO

Em usinas hidrelétricas, o rendimento da turbina hidráulica está intimamente ligado à vazão presente e, assim, o monitoramento contínuo e confiável desta grandeza se torna extremamente importante. Embora existam diversas abordagens para medições de vazão, o método ultrassônico de multi-trajetórias tem ganhado interesse pela indústria e por pesquisadores, pois tais medidores apresentam robustez, boa exatidão e precisão, e podem atingir classes de exatidão menores que 2%. Esta abordagem também permite a medição de grandes vazões, medições bidirecionais de fluxo e flexibilidade quanto ao fluido a ser medido. O presente trabalho apresenta o desenvolvimento de um medidor de vazão ultrassônico de multi-trajetórias utilizando o método de tempo de trânsito, com base nas informações contidas na norma IEC41. O protótipo desenvolvido consiste na eletrônica de emissão e recepção das ondas ultrassônicas, processamento de sinais e no software de cálculo de vazão. O projeto visa o uso de dezesseis transdutores, formando oito trajetórias acústicas divididas em dois planos cruzados, porém, arranjos com outras estruturas são previstos no sistema. Na distribuição das trajetórias no duto circular, aplicou-se o método de integração OWICS (do inglês *Optimal Weighted Integration for Circular Sections*). O MATLAB[®] foi usado para receber os dados do sistema de aquisição, realizar o processamento de sinais e fazer os cálculos dos tempos de trânsito, utilizados na estimação da vazão. A técnica de Correlação Cruzada foi utilizada para medir os tempos de trânsitos entre os sinais ultrassônicos. Este artigo também apresenta os primeiros resultados do desenvolvimento do protótipo do medidor de vazão ultrassônico.

Palavras-Chaves: Medidores de Vazão Ultrassônicos; Tempo de Trânsito; Correlação Cruzada

¹ Universidade Federal de Itajubá - Av. BPS, 1303 -CEP 37500-090 - Itajubá/MG, Brasil

² Instituto Gnarus - Rua Cel. Francisco Braz, 185, Sala 307, Centro – CEP 37500-052, Itajubá/MG, Brasil

³ Rennosonic Tecnologia LTDA – Rua José Joaquim, 224, Varginha – CEP 37501-144 – Itajubá/MG, Brasil

DEVELOPMENT OF MULTI-PATH ULTRASONIC FLOWMETER FOR TRANSIT TIME

ABSTRACT

In hydroelectric power plants, the efficiency of the hydraulic turbine is closely related to the water flow, thus the continuous and reliable monitoring of this quantity becomes extremely important. Although there are several approaches for flow measurements, the multi-path ultrasonic method has gained particular interest by industry and researchers, because such meters are robust, are provided with good accuracy and precision, and can achieve accuracy classes lower than 2%. This approach also allows the measurement of large flows, bidirectional flow measurements and flexibility regarding the fluid to be measured. This work presents the development of a multi-path ultrasonic flowmeter using the transit time method, based on information contained in the IEC 41 standard. The prototype developed comprises the electronic emission and reception of ultrasonic waves, signal processing and flow calculation software. The project aims to use sixteen transducers, forming eight acoustic paths divided into two crossed planes, however, arrangements with other structures are also considered in the system. The OWICS (Optimal Weighted Integration for Circular Sections) integration method has been applied in the distribution of trajectories in the circular conduit. The MATLAB® has been used to receive the acquisition system data, to perform the signal processing and to calculate the transit times used to estimate the flow. The cross-correlation technique has been used to measure the transit time between the ultrasonic signals. This article also presents the first results of the development of the ultrasonic flowmeter prototype.

KEYWORDS: Ultrasonic Flowmeter; Transit Time; Cross - Correlation

1. INTRODUÇÃO

Uma das grandezas mais medidas nos processos industriais é a vazão de um fluido. A importância de medir essa grandeza está relacionada à característica dessa medida afetar outras variáveis do processo tais como: pressão, nível, temperatura e teor químico (PEREIRA, 2009). Em aplicações específicas como em usinas hidrelétricas, a medição da vazão de água nos dutos hidráulicos é um fator determinante para estimação do rendimento da máquina elétrica na geração de energia, devendo esta grandeza ser monitorada constantemente (ANEEL, 2013). Desta forma, um sistema de medição de vazão preciso e exato torna-se necessário.

Há muitos tipos de medidores de vazão no mercado, porém os medidores ultrassônicos vêm ganhando grande notoriedade e estão sendo aplicados em grandes escalas. O uso crescente desses medidores está associado a diversos aspectos, tais como: versatilidade do aparelho em aplicações envolvendo diferentes fluidos; alta precisão e reprodutibilidade; possibilidade de medições bidirecionais de fluxo; entre outros.

Outro detalhe que elevou o uso de medidores de vazão ultrassônico foi o desenvolvimento tecnológico. Como dito em (LYNNWORTH e LUI, 2006), a crescente utilização do uso de ultrassom está relacionada ao desenvolvimento da eletrônica e das técnicas de processamento digital de sinais, além da melhoria dos transdutores ultrassônicos utilizados, sobretudo dos transdutores do tipo *clamp-on*.

Dentre os métodos de medição de vazão ultrassônicos, o método por tempo de trânsito por multi-trajetórias tem se destacado em aplicações envolvendo condutos de grandes diâmetros. O princípio de medição de vazão ultrassônica por tempo de trânsito é mostrado na Figura 1.

Dois transdutores são dispostos em lados opostos do conduto, formando entre eles uma trajetória acústica inclinada de um ângulo φ em relação à direção do fluxo e de distância L_i . Os transdutores de mesma trajetória acústica enviam e recebem pulsos ultrassônicos. Assim, a partir desta troca de sinais entre os transdutores, a velocidade pontual do fluxo na trajetória (v_i) pode ser estimada através da relação dos tempos dos pulsos ultrassônicos viajando a favor (t_{i-down}) e contra (t_{i-up}) o fluxo, conforme

$$v_i = \frac{L_i}{2 \cdot \cos\varphi} \cdot \left(\frac{t_{i-down} - t_{i-up}}{t_{i-up} \cdot t_{i-down}} \right) \quad (1)$$

Com o uso de múltiplas trajetórias acústicas dispostas em posições distintas da linha central do conduto, como mostrado na Figura 2, é possível estimar diferentes velocidades pontuais de fluxo (v_i) e, através de um método de integração numérica, a velocidade média axial do fluxo (v_{ax}) no interior do conduto pode ser estimada. A velocidade média axial do fluxo no interior da tubulação é dada por

$$v_{ax} = \sum_{i=1}^n \frac{L_i \cdot w_i}{2 \cdot \cos\varphi} \cdot \left(\frac{t_{i-up} - t_{i-down}}{t_{i-down} \cdot t_{i-up}} \right), \quad (2)$$

onde o subscrito i representa o número da trajetória; L_i denota distância entre dois transdutores pertencentes a trajetória acústica i ; φ é o ângulo de inclinação da trajetória i ; t_{i-up} e t_{i-down} são o tempo de trânsito contra e a favor do fluxo respectivamente; v_{ax} é a velocidade axial média do fluido no interior do conduto; w_i é o coeficiente de ponderação determinado pelo método de integração utilizado no sistema; e n é o número de trajetórias acústicas no sistema.

A relação da vazão com a velocidade média axial é dada por

$$Q_v = \pi R^2 \sum_{i=1}^n \frac{L_i \cdot w_i}{2 \cdot \cos \varphi} \cdot \left(\frac{t_{i-up} - t_{i-down}}{t_{i-down} \cdot t_{i-up}} \right), \quad (3)$$

onde Q_v é a vazão e R o raio interno do conduto.

Os métodos de integração são fatores que influenciam nos erros de estimação de vazão. A versão da norma IEC41 (1991) exemplifica dois métodos de integração: Gauss-Legendre (seções retangulares) e Gauss-Jacobi (seções Circulares). Contudo, novos métodos de integração vêm sendo estudados, destacando o chamado OWICS (*Optimal Weighted Integration for Circular Sections*) e OWIRS (*Optimal Weighted Integration for Rectangular Sections*), usados em seções circulares e retangulares, respectivamente (VOSER, 1999). O que diferenciam os métodos descritos na norma e os novos citados são os perfis de velocidades (TRESCH, GRUBER e STAUBLI, 2006). Os primeiros propõem perfis de velocidades uniformes, mostrado na Figura 3.a, enquanto os outros propõem perfis de velocidades totalmente desenvolvidos, como mostra a Figura 3.b.

Como a distribuição de velocidade é em função do número de Reynolds (Re) e da rugosidade da parede do conduto, o primeiro perfil não leva em consideração a rugosidade da parede do conduto, enquanto o segundo perfil de velocidade leva em consideração esta característica.

Segundo a teoria (PETRUT, IOANA, *et al.*, 2014), a função de fluxo de área é dada por

$$F_{ideal}(z) = C \left(1 - \frac{z^2}{R^2} \right)^\kappa, \quad (4)$$

onde C é uma constante, z é a altura da trajetória e o parâmetro κ define qual tipo de integração é usada. Para seções circulares, o $\kappa = 0,5$ é o valor dado para o método Gauss-Jacobi, enquanto para o OWICS é $\kappa = 0,6$ (VOSER, 1999).

A proposta do artigo é apresentar os primeiros resultados do desenvolvimento de um medidor de vazão ultrassônico multi-trajetórias, como descrito anteriormente, o qual seguiu as especificações dadas pela norma IEC41 (1991). O artigo explica os blocos que constituem a eletrônica do medidor de vazão e detalha a teoria do processamento utilizado para determinar o tempo de trânsito entre os transdutores.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Descrição do sistema eletrônico

A estrutura do sistema eletrônico desenvolvido é mostrada na Figura 4. O sistema é constituído por transdutores ultrassônicos, multiplexador, bloco pulsador, controlador de

periféricos, chave de seleção de transmissão/recepção (*T/R Switch*), sistema de aquisição de sinais (SAQS) e a central de processamento de dados (CPD).

A seguir, são apresentadas as descrições individuais dos blocos mostrados na Figura 4.

2.1.1. Transdutores Ultrassônicos

Pode-se dizer que o transdutor ultrassônico é o principal componente do medidor ultrassônico, uma vez que a onda ultrassônica enviada e recebida a partir do mesmo, determina diretamente o desempenho da medida de vazão e toda arquitetura de hardware do sistema de medição. Para selecionar um transdutor ultrassônico, vários parâmetros devem ser levados em consideração, tais como a frequência de ressonância, largura de banda, faixa de detecção, entre outros. A frequência de ressonância influencia na atenuação do sinal e na relação sinal-ruído (ou SNR, do inglês *Signal-to-Noise Ratio*) (BRASSIER, HOSTEN e VULOVIC, 2001). Os transdutores ultrassônicos são comumente excitados por pulsos elétricos de curta duração de tempo. As formas mais comuns de pulsos de excitação são sinais quadrados (unipolar ou bipolar) e *spikes* (picos de tensão) podendo ser negativo ou positivo (XIAO, REN, *et al.*, 2013). Neste trabalho, foi utilizado transdutores com frequência de ressonância de 1 [MHz].

2.1.2. Multiplexador

Um sistema multiplexado é muito utilizado na área ultrassônica para aplicações médicas onde os transdutores ultrassônicos *Phased Array* possuem centenas de elementos piezoelétricos em sua estrutura. Logo, multiplexar o uso dos transdutores reduz a eletrônica, diminuindo também os custos associados.

A eletrônica do medidor de vazão em desenvolvimento é capaz de multiplexar 16 transdutores ultrassônicos.

2.1.3. Chave de seleção de transmissão/recepção (T/R Switch)

Um circuito *T/R Switch* tem duas funcionalidades no sistema e possui diferentes tipos de topologia (CAMACHO e FRITSCH, 2008). A primeira função é proteger o circuito de condicionamento de sinais dos pulsos de alta tensão responsáveis pela excitação dos transdutores. A segunda função é permitir a passagem do sinal ultrassônico recebido pelo transdutor para o sistema de aquisição de sinais, isto é necessário, pois o mesmo transdutor recebe e transmite sinais ultrassônicos e os pulsos de excitação dos transdutores podem danificar a eletrônica do sistema de aquisição de sinais. É utilizado um circuito *T/R Switch*

contendo diodos Schottky responsáveis pelo chaveamento rápido e capazes de suportar picos de tensão de até 100V.

2.1.4. Pulsador

O bloco denominado Pulsador gera o sinal de excitação do transdutor piezoelétrico. Sua estrutura interna baseia-se em circuitos baseados na tecnologia MOSFET. Há diversos tipos de topologias de circuitos (SVILAINIS, DUMBRAVA e CHAZIACHMETOVAS, 2015), os quais definem o tipo de sinal de excitação de transdutores (*spikes* e quadrados). A topologia utilizada no hardware do projeto permite gerar pulsos quadrados unipolares e bipolares.

2.1.5. Controlador de Periféricos (CP)

Esse bloco é responsável por controlar todos os periféricos do *hardware* do sistema eletrônico. Muitas destas estruturas de controle baseiam-se em FPGA's (WANG, 2009), enquanto outras, utilizam microcontroladores (CHEN, LI e WU, 2013). O projeto utiliza um microcontrolador construídos com a arquitetura ARM[®].

2.1.6. Sistema de Aquisição de Sinais (SAQS)

O sistema de aquisição de sinais faz parte do bloco SAQS. Este bloco é responsável por fazer o tratamento do sinal recebido pelos transdutores. Pode ser dividido em três importantes partes: filtros analógicos, amplificadores de sinais e conversores analógicos digitais (ou ADC, do inglês *Analog-to-Digital Converter*). Os filtros analógicos são aplicados para minimizar os efeitos de ruídos no sinal recebido pelos transdutores, sendo comum o uso de filtros ativos passa baixa ou passa faixa (WANG, 2009). Na amplificação de sinais, os AGC's (do inglês *Automatic Gain Control*, ou controle de ganho automático) são empregados (PÉREZ, PUEYO e LÓPEZ, 2011), pois são capazes de estabilizar de forma automática a amplitude do sinal recebido em um nível de amplitude pré-determinado. Por fim, os ADC's fazem a conversão do sinal recebido de forma analógica para digital, com isso o uso de processamentos digitais de sinais é possível.

2.1.7. Central de Processamento de Dados (CPD)

A CPD tem duas importantes funções no sistema: a primeira está ligada a comunicação e gerenciamento do CP e o SAQS; e a segunda é realizar o processamento de dados. O *software* MATLAB[®] foi escolhido para desenvolver o *software* do sistema, pois possibilita a comunicação com o CP e o SAQS, além de possuir todas as ferramentas necessárias para realizar o processamento de dados.

2.2. Estimacão do tempo de voo (ToF, do inglês *Time-of-Flight*)

As técnicas relacionadas  medio de tempo de atraso através de sinais ultrassônicos são descritas na literatura científica como técnicas de *Time-of-Flight* (SVILAINIS e DUMBRAVA, 2008). O projeto utiliza a técnica de Correlao Cruzada (CC) para estimar o ToF de um sinal ultrassônico entre dois transdutores (SVILAINIS e DUMBRAVA, 2008). A correlao  uma operao entre duas sequências, cujo objetivo consiste em medir a similaridade que existe entre elas. Para este propósito, considera-se duas sequências digitais tx_k e rx_k que se deseja comparar, em que tx_k representa as amostras do sinal transmitido e rx_k as amostras do sinal recebido. O problema consiste em determinar o atraso de tempo do sinal recebido em relao ao sinal transmitido. Este atraso está relacionado a aplicao da Funo de Correlao Cruzada (CCF) entre duas sequências que  definida pela seguinte (SVILAINIS e DUMBRAVA, 2008)

$$CCF_k = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N rx_n \cdot tx_{n-k}, \quad (5)$$

onde o ToF estimado está relacionado a posio no tempo do maior pico da Funo de Correlao Cruzada dado por

$$ToF_{CC} = \arg[\max(CCF_k)]. \quad (6)$$

2.3. Diagrama de bloco do funcionamento do medidor de vazão

O diagrama de bloco de funcionamento do medidor de vazão  mostrado na Figura 5. O sistema inicia-se com as entradas de dados. São eles: número de trajetórias; comprimento das trajetórias; tipo de conduto; tipo de integrao; tipo do transdutor, ângulos formados pelas trajetórias acústicas e entradas de temperatura e pressão. Após isso, o sistema de controle de periféricos  configurado para atender os parâmetros de entrada do sistema, sobretudo, os relacionados aos transdutores ultrassônicos utilizados.

Em seguida, uma calibrao do sistema  realizada. Esta parte está relacionada ao levantamento de informaes sobre o sistema, o qual caracteriza se o sistema está apto a adquirir os dados de medio ou se ainda  necessário mudar alguma etapa de funcionamento, como por exemplo alinhamento dos transdutores

Estando todo sistema apto para medio, um número de ciclos  selecionado pelo usuário para começar o processo de medio. Iniciando o processo de medio os transdutores enviam e recebem ondas ultrassônicas, as quais passam por um sistema de aquisio de sinais que, por sua vez, condiciona o sinal e faz a conversão do sinal analógico para o digital. Após isso, na central de processamentos de dados, o sinal digital passa por filtros digitais, o cálculo de tempo de trânsito  feito e, por fim, a velocidade média do fluxo e a vazão são calculadas.

Outros dados também são calculados, como o número de Reynolds, viscosidade, velocidade do som, entre outros. Com todos os cálculos realizados, eles são armazenados e mostrados para o usuário do medidor de vazão. O processo é finalizado quando o número de medições exigido pelo usuário foi esgotado.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para testar o funcionamento do hardware e algoritmos de cálculos de tempo de trânsito, velocidade e vazão dois tipos de experimentos foram preparados. O primeiro consistia em simular uma medição de vazão de um caso real e o outro tratou-se de testar o hardware do medidor de vazão.

3.1. Simulação de uma medição de fluxo baseado em um caso real

O objetivo deste experimento é testar, através de ondas ultrassônicas simuladas no MATLAB[®], os algoritmos de cálculo de Tempo de Trânsito por Correlação, velocidade do fluxo e a vazão. Esta etapa baseou-se nos dados reais de uma medição de vazão obtida pela empresa Rennosonic. O aparelho que eles utilizam para fazer medições em campo é o LEFM[®] 880 *Series Ultrasonic Flowmeter* da empresa CAMERON, o qual permite diversos tipos de configurações de trajetórias. Utilizaram uma configuração de 2 planos de medição contendo cada plano 4 trajetórias, conforme a Figura 2, obedecendo ao posicionamento de trajetórias do Quadro 1. Os dados da instalação das trajetórias estão no Quadro 2. Os resultados das medições em campo estão no Quadro 3 e foram utilizadas 33 amostras para gerar a média e o desvio padrão. A partir desses dados, uma simulação no MATLAB[®] foi realizada.

Através de um algoritmo desenvolvido no MATLAB[®], os sinais ultrassônicos de emissão e recepção para cada transdutor de cada trajetória acústica foram simulados com SNR de 40. A Figura 6 ilustra os sinais ultrassônicos da simulação. O Sinal recebido por cada transdutor possui um tempo de atraso representado na Figura 6 pela sinalização T_{delay} . Este tempo está relacionado com os tempos descritos no Quadro 3, onde T_{down} representa o tempo de trânsito a favor do fluxo e o tempo contra o fluxo é a soma de T_{down} mais ΔT . Logo, cada trajetória acústica possui dois transdutores sendo um para medir o tempo a favor do fluxo e outro transdutor mede o tempo contra o fluxo.

Com os sinais ultrassônicos das trajetórias acústicas simulados, o próximo passo foi calcular o tempo de trânsito de cada trajetória através do algoritmo de Correlação. Após isso, o cálculo

de velocidade e vazão foram calculados pelos respectivos algoritmos. Utilizou os dois métodos de integração OWICS e Gauss – Jacobi para realizar o cálculo de vazão. Os resultados obtidos estão no Quadro 4. Comparou-se os resultados obtidos em campo com os resultados obtidos pela simulação, os quais estão no Quadro 5. É possível observar que os valores calculados apresentaram erros em relação ao valor de medição em campo menores que 3%, destacando erros relativos a T_{down} que são inferiores a 0.05%. Em relação a vazão, o método OWICS apresentou um erro relativo de 0.177%, enquanto pelo Gauss-Jacobi apresentou 0.374 %.

3.2. Experimento com a eletrônica do sistema de medição de vazão

Um outro experimento foi feito para testar a eletrônica do sistema de medição de vazão. O objetivo deste experimento é medir a distância entre os transdutores através da eletrônica do medidor de vazão. Foram utilizadas quatro trajetórias acústicas dentro de um tanque com água, sendo que cada trajetória acústica tinha uma distância diferente, seus valores estão no Quadro 6. Os transdutores utilizados possuíam frequência central de 1 [MHz], foram realizadas 1600 medições para cada trajetória acústica utilizando um tempo de amostragem de 16 [ns] do sistema de aquisição de dados.

Segundo a teoria, a velocidade do som na água (c) à 22 [°C] é de $c = 1488.5$ [m/s], dividindo as distâncias (L_i) entre os transdutores têm-se os tempos teóricos de propagação da onda ultrassônica ($\tau_i = L_i/c$), representados no Quadro 6. Logo, ao medir os tempos de trânsito entre os transdutores é possível obter os valores de distância entre os transdutores pela seguinte equação

$$L_{cal_i} = c \cdot \left(\frac{t_{upi} + t_{downi}}{2} \right), \quad (7)$$

onde t_{upi} e t_{downi} são os tempos calculados através do hardware do medidor de vazão; c velocidade do som na água e L_{cal_i} a distância medida através da eletrônica. Os valores obtidos pela eletrônica do medidor de vazão estão no Quadro 6. Os erros relativos aos valores teóricos e medidos estão no Quadro 7. Observou que os erros relativos foram inferiores à 0.03 %.

4. CONCLUSÃO

Este artigo relatou o desenvolvimento de um medidor de vazão multi-trajetórias e os primeiros resultados obtidos. Como mostrado, o projeto se divide em dois grupos: desenvolvimento do *hardware* do medidor de vazão e desenvolvimento dos algoritmos que

compõe o software do projeto. O *hardware* descrito é capaz de utilizar dezesseis transdutores ultrassônicos, através do uso de um multiplexador. Além disso, a eletrônica possui um sistema capaz de variar o pulso de excitação dos transdutores, circuito de proteção dos circuitos de baixa tensão, um sistema de aquisição de dados e uma central de processamento. Todo controle de periféricos se baseia em um microcontrolador ARM[®]. O *hardware* desenvolvido até o momento tem apresentado bons resultados de funcionamento. Como dito também no decorrer do artigo, todo desenvolvimento do projeto baseia-se na norma IEC 41, logo, os algoritmos desenvolvidos para determinar a vazão baseiam-se nesta norma. Foram descritos apenas algumas funções do *software*, como o cálculo de tempo de trânsito através da técnica de Correlação Cruzada e o funcionamento geral do medidor de vazão.

Como validação da primeira etapa de desenvolvimento do projeto, dois experimentos foram relatados. O primeiro se baseou em uma simulação em MATLAB[®] de uma medição de vazão baseada em um caso real de medição feito pela empresa Rennosonic. Foi gerado sinais ultrassônicos semelhantes aos transmitidos e recebidos pelos transdutores, com o intuito de repetir os cálculos de tempo de trânsito, velocidade e vazão através dos algoritmos desenvolvidos para aplicação no projeto. Como observado na seção anterior os resultados apresentaram boas proximidades dos valores reais medidos, obtendo erros relativos na medição de tempo de trânsito inferiores a 0.05% em alguns casos. Em relação a vazão, foi observado erros pequenos, o método OWICS apresentou um erro relativo de 0.177%, enquanto pelo Gauss-Jacobi apresentou 0.374 %. Estes resultados obtidos foram satisfatórios até o momento, uma vez que apresentaram erros relativamente baixos. A segunda experiência foi medir diferentes distâncias com a eletrônica do sistema. Foram usadas quatro diferentes distâncias e o erro do valor medido em relação a distância real foi menor que 0.03%. Os erros apresentados foram satisfatórios.

Após esta primeira etapa de desenvolvimento da eletrônica, desenvolvimento dos algoritmos de cálculos de vazão e testes básicos de medição apresentados neste artigo, o próximo objetivo é medir vazões em instalações reais e será relatado em trabalhos futuros.

5. AGRADECIMENTOS

Este projeto está sendo desenvolvido pela empresa Rennosonic Tecnologia LTDA em parceria com o Instituto GNARUS e a empresa P S Soluções, financiado pela FAPEMIG. Agradecemos a colaboração de todos os envolvidos no projeto.

6. REFERÊNCIAS

- ANEEL. Resolução normativa no 583, de 22 de Outubro de 2013. 2013.
- BRASSIER, P.; HOSTEN, B.; VULOVIC, F. High-frequency transducers and correlation method to enhance ultrasonic gas flow metering. *Flow Measurement and Instrumentation*, 12, June 2001. 201-211.
- CAMACHO, J.; FRITSCH, C. Protection Circuits for Ultrasound Applications. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 55, n. 5, may 2008. 1160-1164.
- CHEN, Q.; LI, W.; WU, J. Realization of a multipath ultrasonic gas flowmeter based on transit-time technique. *Ultrasonics*, Elsevier, v. 54, p. 285-290, 2013.
- IEC41. IEC 60041: 1991 - Field acceptance tests to determine the hydraulic performance of hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines. Geneva, Switzerland: International Standard / International Electrotechnical Commission. 1991.
- LYNNWORTH, C.; LUI, Y. Ultrasonic Flowmeter: Half-century progress report, 1955-2005. *Proceedings of Ultrasonics International (UI'05) and World Congress on Ultrasonics (WCU)*. Beijing: Elsevier. 2006. p. 1371 - 1378.
- MARUSHCHENKO, S.; GRUBER, P. Comparative study of 4(8)-PATH and 5(10)-Path configurations for ATT flow measurements in circular conduits. *Hidro&Hydro - PCH Notícias & SHP News*, Itajubá - MG - Brazil, v. 15, n. 62, p. 8-15, jul 2014.
- PEREIRA, M. Flow Meters: Part 1. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, p. 18-26, February 2009.
- PÉREZ, J. P. A.; PUEYO, S. C.; LÓPEZ, B. C. *Automatic Gain Control - Techniques and Architectures for RF Receivers*. 1. ed. New York, USA: Springer, 2011.
- PETRUT, T. et al. Flow rate computation of highly turbulent pipe flows using wide-band signals and matched filter-based approach in ultrasonic multi-element configuration. *Hidro&Hydro - PCH Notícias & Ship News*, Itajubá, Minas Gerais, Brasil, v. 63, p. 8-12, out/dez 2014.
- RENNOSONIC. RTL. Site da Rennosonic Tecnologia LTDA. Disponível em: <<http://www.renno.com.br/rennosonic/Pagina.do>>. Acesso em: 15 jul. 2016.
- SVILAINIS, L.; DUMBRAVA, V. The time-of-flight estimation accuracy versus digitization parameters. *ULTRAGARSAS*, Kaunas, Lithuania, v. 63, n. 1, p. 12-17, 2008.
- SVILAINIS, L.; DUMBRAVA, V.; CHAZIACHMETOVAS,. Investigation of the Half Bridge and Transformer Push-Pull Pulser Topologies for Ultrasonic Transducer Excitation. *Journal of Circuits, Systems and Computers*, v. 24, n. 5, junho 2015.
- TRESCH, T.; GRUBER, P.; STAUBLI, T. Comparison of Integration methods for multipath acoustic discharge measurements. *6 International Conference on Innovation in Hydraulic Efficiency Measurements*. Portland, Oregon, USA: IGHEM. 2006.

VOSER, A. Analyse und Fehleroptimierung der mehrpfadigen akustischen Durchflussmessung in Wasserkraftanlagen. ETH Zürich, Zürich, 1999.

WANG, Y. New-type Ultrasonic Flow meter design based on FPGA High-speed Data Sampling. 9th International Conference on Electronic Measurement & Instruments. Beijing, China: IEEE. 2009. p. 509-512.

XIAO, D. et al. Response characteristics of ultrasonic transducer under different excitation pulses. Nondestructive Evaluation/Testing: New Technology & Application (FENDT), 2013 Far East Forum on. Jinan, China: IEEE. 2013. p. 135 - 140.

Fonte: (IEC41, 1991)

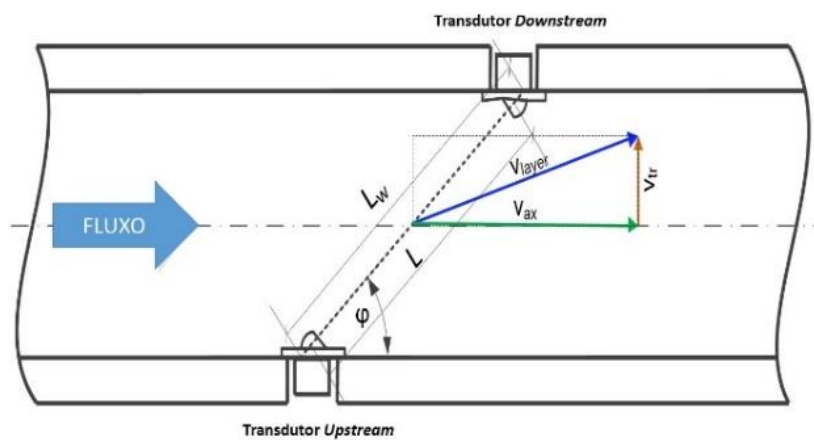


Figura 1 - Princípio de medição de vazão ultrassônica

Fonte: (TRESCH, GRUBER e STAUBLI, 2006)

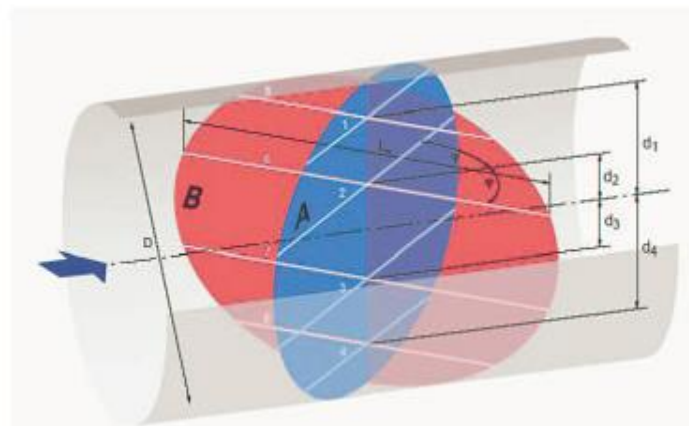


Figura 2 - Princípio de medição de vazão ultrassônica multi-trajetórias

Fonte: (TRESCH, GRUBER e STAUBLI, 2006)

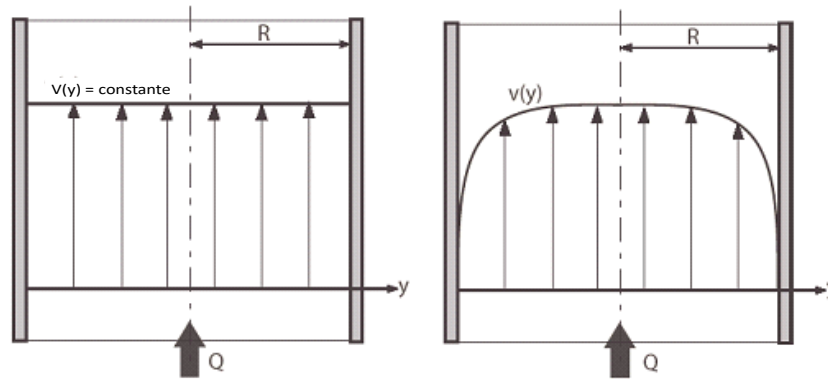


Figura 3 - (a) Perfil de velocidade uniforme. (b) Perfil de velocidade totalmente desenvolvido.

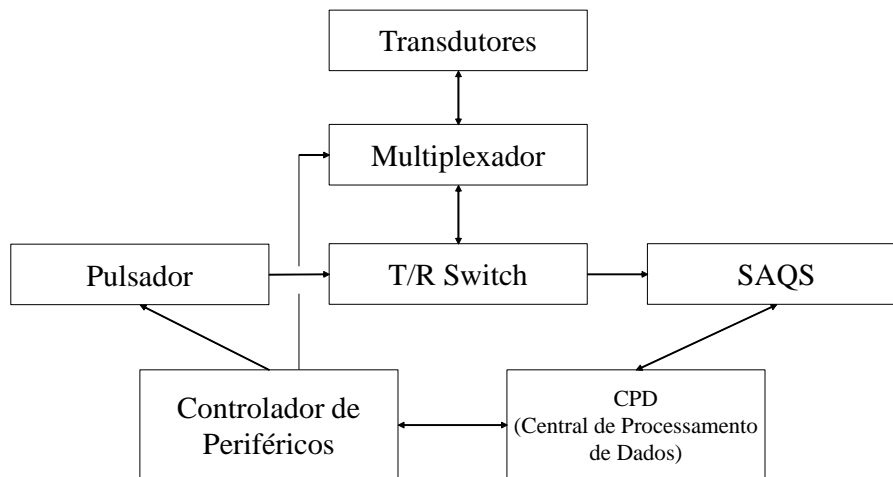


Figura 4 - Sistema de medição de Vazão Ultrassônico

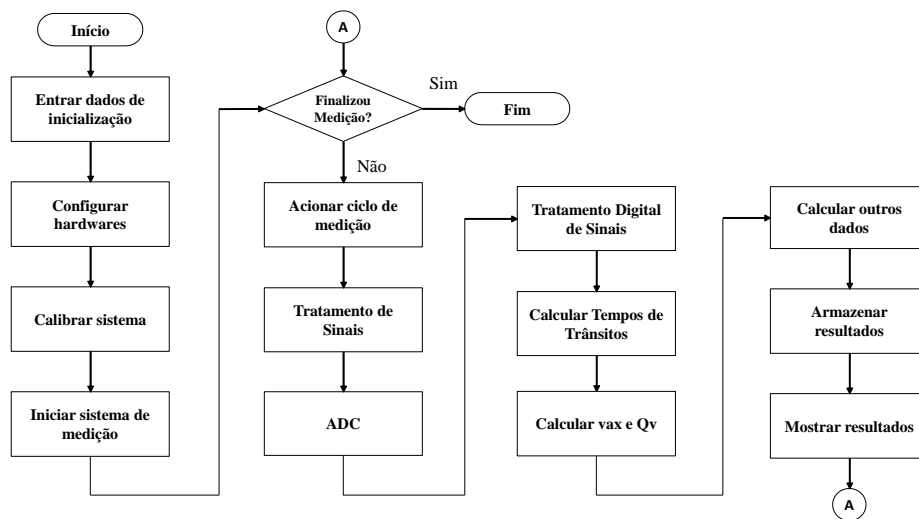


Figura 5 – Algoritmo de funcionamento do medidor de vazão

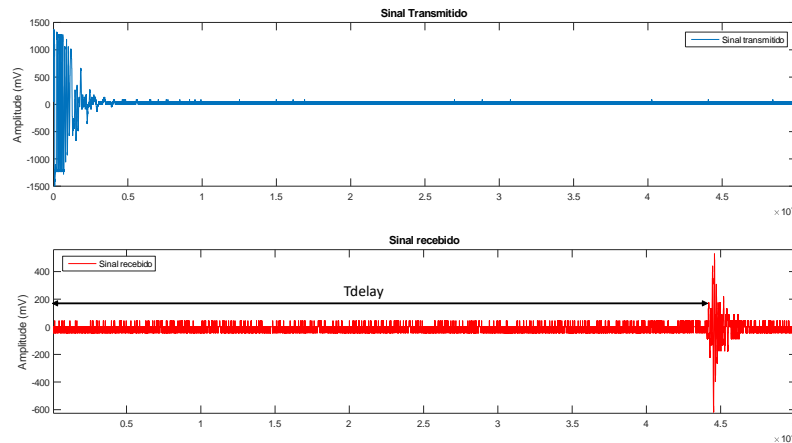


Figura 6 – a-) Sinal ultrassônico transmitido pelo transdutor; b-) Sinal ultrassônico recebido pelo transdutor

Quadro 1 – Posicionamento das trajetórias acústicas no conduto

Trajetórias	Gauss - Jacobi 4-trajetórias		OWICS 4-trajetórias	
	zi/R [-]	wi [-]	zi/R [-]	wi [-]
1	0.809017	0.369317	0.809017	0.365222
2	0.309017	0.597566	0.309017	0.598639
3	-0.309017	0.597566	-0.309017	0.598639
4	-0.809017	0.369317	-0.809017	0.365222

Fonte: (MARUSHCHENKO e GRUBER, 2014).

Quadro 2 – Dados da instalação do Medidor de Vazão

Diâmetro (m)	4.8
Espessura (mm)	15.875
Ângulo (ϕ)	65

Trajetórias	Comprimento (m)
1	3.0666
2	5.0353
3	5.0400
4	3.0477
5	3.0618
6	5.0353
7	5.0400
8	3.0666

Fonte: (RENNOSONIC).

Quadro 3 - Dados reais de medição em campo feita pela empresa Rennosonic

Trajetórias	Tdown (ns)	deltaT (ns)	velocidade (m/s)
1	2038817 ± 63	2787 ± 45	2.4104 ± 0.0377
2	3357690 ± 53	4128 ± 53	2.1551 ± 0.0356
3	3359816 ± 67	4343 ± 18	2.2631 ± 0.0091
4	2044808 ± 134	2552 ± 66	2.2412 ± 0.1279
5	2047357 ± 69	2610 ± 16	2.2503 ± 0.0153
6	3353481 ± 50	4533 ± 32	2.3726 ± 0.0174
7	3359816 ± 67	4343 ± 18	2.2631 ± 0.0101

Anexo II

8	2051521 ± 109	2654 ± 29	2.2783 ± 0.0239
---	---------------	-----------	-----------------

Vazão (m ³ /s)	41.7558 ± 0.1434
------------------------------	------------------

Fonte: (RENNOSONIC).

Quadro 4 – Dados calculados pelo algoritmo do medidor de vazão

Trajatórias	Tdown (ns)	deltaT (ns)	velocidade (m/s)
1	2038402 ± 81	2815 ± 44	2.4543 ± 0.0318
2	3357664 ± 64	4160 ± 71	2.1890 ± 0.0373
3	3359802 ± 73	4377 ± 20	2.3002 ± 0.010
4	2044790 ± 142	2621 ± 65	2.2711 ± 0.0563
5	2047340 ± 58	2639 ± 18	2.2816 ± 0.0157
6	3353466 ± 63	4570 ± 33	2.4103 ± 0.0174
7	3359802 ± 68	4377 ± 20	2.3001 ± 0.0102
8	2051487 ± 109	2691 ± 32	2.31696 ± 0.0275

Vazão pelo método Gauss - Jacobi

Vazão (m ³ /s)	41.9121 ± 0.1263
------------------------------	------------------

Vazão pelo método OWICS

Vazão (m ³ /s)	41.83 ± 0.1309
------------------------------	----------------

Quadro 5 – Erros relativos entre dados em campo e calculados

Trajatórias	Erro Tdown (%)	Erro deltaT (%)	Erro Velocidade (%)
1	0.0204	1.0047	1.8213
2	0.0008	0.7752	1.5730
3	0.0004	0.7829	1.6393
4	0.0009	2.7038	1.3341
5	0.0008	1.1111	1.3909
6	0.0004	0.8162	1.5890
7	0.0004	0.7829	1.6349
8	0.0017	1.3941	1.6969

Quadro 6 – Dados de medição de trajetórias Teóricos e Medidos

	Dados Teóricos		Dados Medidos	
	Distância (m)	Tempo (τ) (ns)	Distância (m)	(Tdown+Tup)/2 (ns)
1	0.5	335918.5	0.500017	335930.9
2	1	671837.7	0.999887	671762.9
3	1.5	1007756.5	1.5000981	1007822.4
4	2	1343675.4	2.000439	1343970.4

Quadro 7 – Erro relativo entre dados teóricos e medidos

	Erro distância (%)	Erro Tempo (%)
1	0.00340	0.00369
2	0.01130	0.01113
3	0.00654	0.00654
4	0.02195	0.02195