



MEDIÇÃO DE VAZÃO EM DUTOS PARCIALMENTE PREENCHIDOS POR
ESPALHAMENTO DA RADIAÇÃO GAMA E A TÉCNICA DE MEDIDA DA
FUNÇÃO DE “CROSS CORRELATION”

Eddie Jesús Avilán Puertas

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Nuclear, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Nuclear.

Orientadores: Delson Braz

Luis Eduardo Barreira Brandão

Rio de Janeiro

Junho de 2019

MEDIÇÃO DE VAZÃO EM DUTOS PARCIALMENTE PREENCHIDOS POR
ESPALHAMENTO DA RADIAÇÃO GAMA E A TÉCNICA DE MEDIDA DA
FUNÇÃO DE “CROSS CORRELATION”

Eddie Jesús Avilán Puertas

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE)
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA NUCLEAR.

Examinada por:

Prof. Delson Braz, D.Sc.

Dr. Luis Eduardo Barreira Brandão, D.Sc.

Prof. Alan Miranda Monteiro de Lima, D.Sc.

Dr. César Marques Salgado, D.Sc.

Prof. Wilson Freitas Rebello Da Silva Jr, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

JUNHO DE 2019

Puertas, Eddie Jesús Avilán

Medição de Vazão em Dutos Parcialmente Preenchidos por Espalhamento da Radiação Gama e a Técnica de Medida da Função de “Cross Correlation”/Eddie Jesús Avilán Puertas. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2019.

XII, 79 p.: il.; 29,7cm.

Orientadores: Delson Braz

Luis Eduardo Barreira Brandão

Tese (doutorado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Nuclear, 2019.

Referências Bibliográficas: p. 73 – 79.

1. Cross Correlation. 2. Vazão. 3. Filtro Savitzky-Golay. I. Braz, Delson *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Nuclear. III. Título.

*Dedico este trabalho a minha
esposa Grisel Virginia, a minha
mãe María de Lourdes, aos meus
filhos Pebbles Dayana e Aris Peter
e aos meus netos Maria Virginia,
Johar Eduardo e Alma.*

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todas as pessoas que desde o primeiro momento acreditaram em mim, no que fiz, e dedicaram seu tempo e bons conselhos para que meu trabalho ganhasse forma, conteúdo e significado. Foram dias, meses, anos de trabalho intenso com momentos de fraqueza, mas graças a eles recarreguei minhas energias e continuei. Essas pessoas correspondem ao exército de trabalhadores que atuam atrás das câmeras na gravação de um filme para que um bom trabalho possa ser deixado. Essa ajuda e esforço, não só permanece no pessoal, vai além, na adaptação e integração ao novo país. Eles me fizeram sentir em casa, como uma família. A seguir, os nomes desse conjunto de estrelas:

Wagner do Prado e Família, peças-chave no começo e na culminação do meu trabalho, já fazem parte de minha família. César Salgado e Família, amigos incondicionais que também abriram suas portas de sua casa para mim e me fizeram sentir parte dela. Sophia e Carolina duas excelentes amigas que sempre ficaram ligadas para o quê eu pudesse precisar. A Eduardo Golçalves por me ajudar na instalação e montagem de alguns dos muitos experimentos que fiz. A Eder Fernando por sua ajuda na facilitação de alguns materiais que precisei durante o trabalho, bem como ao Valério Martins e aos Orientadores, Delson Braz e Luis Brandão.

À minha esposa, Grisel Virginia de Avilán, por ter suportado minhas ausências durante todo esse trajeto e, apesar de tudo, nunca me-deixar de apoiar, amar e dedicar todo o seu tempo e, o mais importante, por ainda continuar acreditando em mim.

À minha mãe, María de Lourdes, por me dar a existência, e educar-me com muita dedicação e amor. À minha filha, Pebbles Dayana, por desde sempre, ter me apoiado incondicionalmente e por ainda me apoiar. Ao meu filho Aris Peter, por sempre correr atrás das muitas papeladas (documentos) complicadas que eu precisei, e que ele fez por mim nestes momentos de tanta confusão política na Venezuela. Aos meus três lindos netos, Maria Virginia, Johar Eduardo e à pequena e muito inteligente Alma, por existir e fazer parte de minha vida. A todos, muito obrigado por ter feito parte desta última jornada profissional de minha vida.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

MEDIÇÃO DE VAZÃO EM DUTOS PARCIALMENTE PREENCHIDOS POR
ESPALHAMENTO DA RADIAÇÃO GAMA E A TÉCNICA DE MEDIDA DA
FUNÇÃO DE “CROSS CORRELATION”

Eddie Jesús Avilán Puertas

Junho/2019

Orientadores: Delson Braz

Luis Eduardo Barreira Brandão

Programa: Engenharia Nuclear

A medição do consumo de água por diferentes usuários (industrial, agrícola, urbano) é essencial, uma vez que em muitos países os “royalties” da água por consumidor são diferenciados pelo perfil do cliente. Portanto, o objetivo deste trabalho foi desenvolver um método para calibração de medidores de vazão de água com incerteza menor que 1,0% usando radiotraçadores e técnica de “Cross Correlation”. Os testes experimentais foram realizados em uma linha de transporte de água, medindo 30 m de comprimento e construída em Policloreto de Vinila. O radiotraçador utilizado foi o Br-82 injetado como um pulso rápido com volumes entre 2,0 e 3,0 ml dependendo do valor da vazão investigada. As aquisições de dados foram feitas com taxa de amostragem variando entre 20 Hz e 1 kHz. Um “correlator (hardware e software)” foi desenvolvido usando métodos matemáticos especiais, tais como: filtragem de Savitzky-Golay e interpolação de Lagrange visando diminuir a incerteza da medida da vazão. Com o novo “correlator” foi possível medir vazões de água em tubos fechados entre 200 L.h⁻¹ e 800 L.h⁻¹ com precisão 1,0%. Esta metodologia combinada com cálculos de frações de volume de água por meio de simulação matemática com o código MCNPX e medidas experimentais estáticas foi, também, capaz de medir vazão em tubos parcialmente preenchidos.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

FLOWRATE MEASURING USING GAMMA RAY DISPERSION AND CROSS CORRELATION TECHNIQUE

Eddie Jesús Avilán Puertas

June/2019

Advisors: Delson Braz

Luis Eduardo Barreira Brandão

Department: Nuclear Engineering

Measurement of water consumption by different users (industrial, agricultural, urban) is essential, because in many countries the "royalties" of water per consumer are differentiated by the customer profile. Therefore, the objective of this work was to develop a method for water flow meters calibration with uncertainty less than 1.0 % applying radio-tracer and Cross Correlation techniques. The experimental tests were carried out in a 30 m length water transport line, constructed in Polyvinyl chloride. Br-82 was used as radio-tracer and injected as a fast pulse with volumes between 2.0 and 3.0 ml depending on the water flow rate investigated. The data recording were made with sampling rates ranging from 20 Hz to 1 kHz. A correlator (hardware and software) was developed using special mathematical methods, such as Savitzky-Golay filtering and Lagrange interpolation in order to reduce the uncertainty of flow measurement. This methodology used along with calculations of water volumes fractions by mean of mathematical simulations with code MCNPX and static experimental measurements made possible to measure flow rate in partially filled tubes.

SUMÁRIO

Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xii
1 Introdução	1
1.1 Revisão bibliográfica	5
1.2 Objetivos	12
2 Fundamentos Teóricos	13
2.1 Vazão	13
2.2 Escoamento de fluidos e o <i>Número de Reynolds</i>	13
2.2.1 Tipos de Escoamento	14
2.3 Medidores de Vazão	15
2.3.1 Medidores de Tipo Mecânico	16
2.3.2 Medidores de Tipo Pressão Diferencial	17
2.3.3 Medidores de Vazão por Ultrassom	18
2.3.4 Medidores de Vazão por Acústica	18
2.3.5 Medidores de Vazão Eletromagnéticos	18
2.3.6 Medida de Vazão usando Radiotraçador pelo Método “Cross Correlation”	19
2.4 Medidores de Fração de Volume	22
2.4.1 Densitômetros de raios gama	23
2.5 Métodos de Medição de vazão em Tubulações	25
2.5.1 Método Califórnia	25
2.5.2 Método de Purdue	26
2.5.3 Método de Manning	27
2.5.4 Método de Traçadores com Acúmulo de Detritos Sólidos.	29
2.6 Filtro Savitzky-Golay (SG)	31
2.7 Métodos de Interpolação	33
2.8 Tipos de Interpolação	33
2.8.1 Polinômio de Lagrange	34

2.9	Procedimentos para Detectar Observações Atípicas em Amostras Experimentais	35
2.9.1	Teste de Grubbs	36
2.9.2	Teste de Dixon	36
2.10	Código MCNPX	37
3	Materiais e Métodos	38
3.1	Sistemas de Detecção	38
3.1.1	Sistema de Detecção 1	38
3.1.2	Sistema de Detecção 2	39
3.2	Calibração dos Detectores	40
3.3	Linha de Transporte	40
3.4	Seção de Teste utilizada para o Cálculo da Fração de Volume	41
3.5	Preparação do Traçador	42
3.6	Correlatores	45
3.6.1	Correlator-1: Sem tratamento matemático especial (STM)	45
3.6.2	Correlator-2: Com tratamento matemático especial (CTM)	46
3.6.3	Filtragem Savitzky-Golay (SG) e Interpolação de Lagrange	47
3.7	Colimação	49
3.8	Efeito da colimação na medição da vazão	50
3.9	Teste da Vazão em Função da Distância	51
3.9.1	Teste da Vazão em Função da Distância usando o Correlator-1	51
3.9.2	Teste da Vazão em Função da Distância usando o Correlator-2	51
3.10	Interferência da Taxa de Amostragem dos Dados na Qualidade do Resultado da Vazão	52
3.10.1	Simulação Taxa de Amostragem	52
3.10.2	Validação Experimental da Taxa de Amostragem	52
3.11	Medidor de Frações de Volume de Água	53
4	Resultados e Discussão	56
4.1	Efeito da colimação do sistema de Contagem na Medição de vazão	56
4.2	Vazão em função da distância	59
4.3	Interferência da frequência de amostragem de dados na qualidade do resultado de vazão	64
4.4	Medidor de Frações de Volume de Água	69
4.5	Geometria de Medição de fração de Volume usando “Dual Modality”	70
5	Conclusões e Sugestões	72
	Referências Bibliográficas	73

LISTA DE FIGURAS

1.1	Porcentagem de água na Terra	1
2.1	Perfil do fluxo para cada um dos três regimes	15
2.2	Medidores de vazão disponíveis no mercado	16
2.3	Tubo de pitot	18
2.4	Geometria para medir a vazão por “Cross Correlation”	19
2.5	Geometria de medida com densitômetro usando feixe estreito de radiação em fluxo laminar: a) Vista frontal b) Vista lateral.	23
2.6	Representação esquemática de tubo parcialmente preenchido	24
2.7	Método California para dutos parcialmente preenchidos	25
2.8	Parâmetros utilizados pelo método de Purdue: a) Saída do jato na extremidade do duto; b) Arremesso de um projétil	27
2.9	Seção transversal dos tubos parcialmente preenchidos	28
2.10	Método de Manning	28
2.11	Tubulação subterrânea, onde h é a altura dos detritos e a, b, c são as dimensões da tubulação	30
2.12	Alisamento por mínimos quadrados de um ajuste local de um polinômio de segundo grau (linha contínua) para um conjunto de cinco dados de entrada: os pontos sólidos “●” são os pontos de entrada, “○” são os pontos de saída dos mínimos quadrados, “x” são os pontos do impulso fixo(constantes ponderadas),(A linha pontilhada denota a aproximação polinomial ao impulso unitário central.)	33
3.1	Diagrama em bloco dos módulos eletrônicos para o registro do sinal de cada detector	38
3.2	Vista em perspectiva do sistema de detecção Ludlum.	39
3.3	Linha de Transporte de Água	41
3.4	Imagens da seção de teste: a) Cilindro acrílico em perspectiva; b) Seção preenchida parcialmente com água, vista frontal.	41
3.5	Bureta de vidro com escala graduada	42
3.6	Esquema de decaimento do ^{82}Br	43

3.7	Espectro de energia do ^{82}Br	44
3.8	Diagrama do Correlator-1	46
3.9	Diagrama do Correlator 2	47
3.10	Gráfico Interpolado	49
3.11	Colimação com Fenda	49
3.12	Colimação aberta sem otimizar	50
3.13	Colimação aberta otimizada	50
3.14	Vista Frontal do medidor de nível	53
4.1	Sinais experimentais nos detectores 1 e 2 para a colimação aberta considerando uma vazão de: a) 200 Lh ⁻¹ ; b) 400 Lh ⁻¹ c)600 Lh ⁻¹ . d)800 Lh ⁻¹	56
4.2	Sinais experimentais nos detectores 3 e 4 para a colimação aberta considerando uma vazão de: a) 200 Lh ⁻¹ ; b) 400 Lh ⁻¹ c)600 Lh ⁻¹ . d)800 Lh ⁻¹	57
4.3	Valores de vazão com suas respectivas incertezas para a colimação Aberta e com Fenda: a) 200 L.h ⁻¹ ; b) 400 L.h ⁻¹ ; c)600 L.h ⁻¹ ; d) 800 L.h ⁻¹	58
4.4	a) Estudo da ação do filtro de Savitzky-Golay no sinal registrado: (a) sinal puro; (b) sinal com 1% de ruído branco; (c) sinal com 10% de ruído branco	60
4.5	Vazão em função da posição para a vazão de referência de: (a) 200 L.h ⁻¹ ; (b) 600 L.h ⁻¹ ; (c) 800 L.h ⁻¹	63
4.6	Resultados sobre a interferência da taxa de amostragem para vazão de: a) 175 L.h ⁻¹ ; b) 720 L.h ⁻¹	66
4.7	Valores de vazão e suas incertezas obtidos para uma taxa de amostragem de 10 Hz com a vazão de: a)200 L.h ⁻¹ ; b) 400 L.h ⁻¹ ; c) 600 L.h ⁻¹ ; d)800 L.h ⁻¹	67
4.8	Valores de vazão e suas incertezas obtidos para uma taxa de amostragem de 1 kHz com a vazão de: a)200 L.h ⁻¹ ; b) 400 L.h ⁻¹ ; c) 600 L.h ⁻¹ ; d)800 L.h ⁻¹	68
4.9	Contagens registradas por ambos dois sistemas em função do volume	69
4.10	Goniómetro desenhado para medir o volume de água num cilindro acrílico	71
4.11	Foto do Goniómetro desenhado para medir o volume de água num cilindro acrílico	71

LISTA DE TABELAS

2.1	Tabela de Incertezas para Alguns dos Dispositivo de Medição de Vazão	22
3.1	Energias e probabilidades de emissão dos fotopicos usadas para calcular o GEB	55
4.1	Resultados da potencialidade do filtro de Savitzky-Golay(SG) por meio do cálculo dos Momentos Estatísticos	61
4.2	Vazão em função da distância.	62
4.3	Valores da Vazão Global para as referencias de:(200, 600, 800)L.h ⁻¹	62
4.4	Simulações usando ambos Correlatores para vazão de (175 L.h⁻¹)	64
4.5	Simulações usando ambos Correlatores para vazão de (720 L.h⁻¹)	65
4.6	Valores da medição de vazão para uma taxa de amostragem de 10 Hz	65
4.7	Valores da medição de vazão para uma taxa de amostragem de 1 kHz	67
4.8	Parâmetros da regressão linear.	70

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Um dos recursos naturais mais importantes da Terra é a água, tem aproximadamente um bilhão e 360 milhões de km³ de água. Desse volume, 97% é salgada. Dos 3% de água doce disponível no planeta só 0,7% é diretamente acessível ao uso humano o que representa uma quantidade pequena [1]. Desse 0,7% de água, cerca de 70% é utilizada em irrigação de plantações e, muita dessa água é contaminada por fertilizantes e pesticidas químicos que impede usá-la novamente Figura 1.1. Dos 30% restantes, aproximadamente 20% são utilizados industrialmente em processos de produção. Os outros 10% são usados para a realização de diversas tarefas, que vão desde o próprio consumo até a elaboração de alimentos, higiene pessoal, limpeza na habitação, entre outros [2].

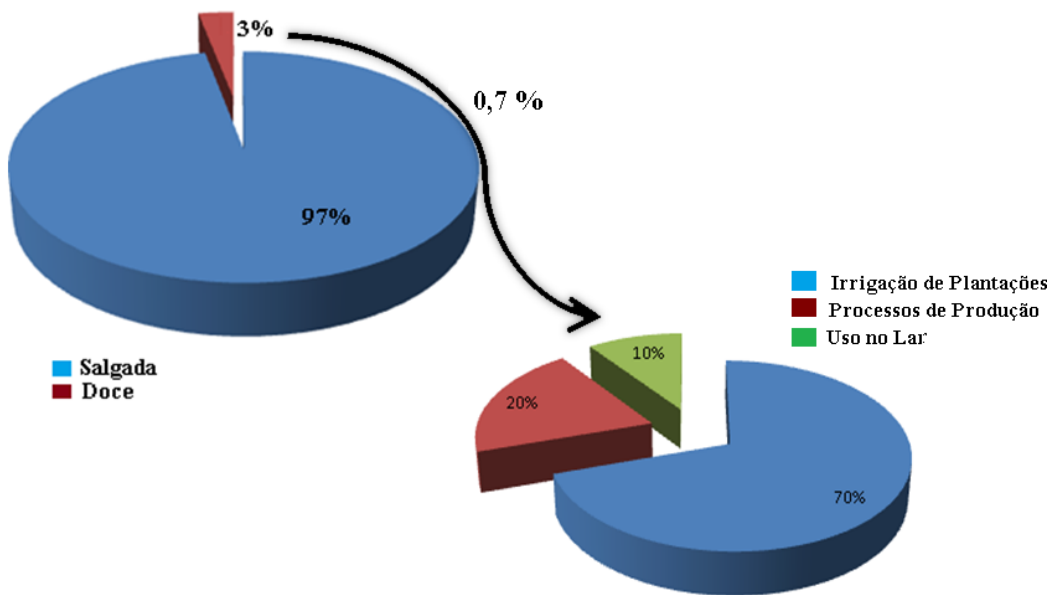


Figura 1.1: Porcentagem de água na Terra

Além disso, o crescimento da população e das indústrias em todo o mundo e o rápido aumento do consumo de água forçaram os governos a estabelecer uma política de gestão impondo condições restritivas ao consumo indiscriminado desse recurso criando, em muitos casos, uma taxa de “royalties” sobre o uso de água. Todos os países enfrentam problemas ou com a qualidade ou com a quantidade da água. No Reino Unido, por exemplo, a crescente demanda por água levou a um aumento significativo na quantidade de água importada [3]. Estimativas da Organização Mundial da Saúde (OMS) e o Fundo das Nações Unidas para a Infância (UNICEF), em inglês “United Nations Children’s

Fund”, indicam que dois terços da população mundial não têm fontes de água potável, China (108 milhões), Índia (99 milhões), Nigéria (63 milhões) são países onde o acesso à água potável é difícil [4].

A escassez de água potável em muitos países gerou uma corrida de muitas empresas para a compra e exploração comercial das fontes de água. Empresas como as francesas Vivendi e Suez-Lyonnaise, a inglesa Thames Water e a estadunidense Bechtel, criaram um mercado das águas que envolve cerca de 100 bilhões de dólares. Por outra parte, a água mineral é comercializada, no mundo todo, pela Nestlé e a Coca-Cola. Segundo a Organização das Nações Unidas, ONU, fica claro que controlar o uso da água significa deter poder [1].

No ano 2000 em Cochabamba, na Bolívia, a empresa Bechtel comprou as fontes de água desse país e elevou os preços deste recurso em 35%. A população indignada forçou à empresa a sair do país [1]. Na Índia a água foi privatizada em quase todo o país gerando insatisfação da população local. E tal situação provocou, também, assaltos aos carros-pipas, havendo necessidade de proteção policial para chegada aos seus destinos [1].

Alguns países, como o Brasil e o Peru, têm uma grande quantidade de água, mas os setores agrícola e de mineração aumentaram a disputa pelo consumo desse bem natural. No Brasil esses conflitos pelo uso da água dobraram desde 2016 de acordo com a Comissão Pastoral da Terra (CPT) [5].

Hoje o debate em relação à água se trava nestes termos: É a água fonte de vida ou fonte de lucro? É um bem natural, vital, comum e insubstituível ou um bem econômico a ser tratado como recurso hídrico e cotizado nas bolsas do mercado?

Além da importância da água para o consumo humano, as indústrias necessitam fabricar seus produtos precisando de água para elaborá-los, por exemplos [6]:

1. Para fabricar cada quilo de aço são necessários 600 litros de água.
2. Para produzir um litro de cerveja precisa-se de três a quatro litros. A maior produtora de cerveja do Brasil gasta por ano 30 bilhões de litros de água.
3. Para fazer uma folha de papel sulfite gasta-se 380 litros.
4. . Para produzir um quilo couro para fabricar roupas e artefatos, gasta-se 16,6 mil litros de água.

América Latina é fundamental porque tem a maior quantidade de água doce no mundo, Brasil, Colômbia e Peru estão entre os 10 países com a maior quantidade de

recursos hídricos. O Brasil possui 13,7 % de toda a água potável no mundo. No futuro, a água terá um valor maior do que o óleo e seu consumo terá que ser racionado. As fontes de água para o consumo humano estão cada vez mais afastadas das cidades e transportá-las até elas com segurança e baixo custo econômico é um problema para os governos.[7] humanas e dos demais seres vivos [1].

O Brasil tem quatro áreas (pontos cardeais) principais que apresentam diferentes contrastes e problemas. No Norte, está a Bacia Amazônica com abundantes recursos de água doce, 70%, mas está praticamente despovoado. O Nordeste com 3% de água doce, semi-árido com constante ameaça de severas secas e em constante luta para sustentar uma população de 40 milhões de pessoas. O Centro-Oeste, com dois ecossistemas dominantes, a savana e as zonas úmidas, é dominado por atividades de pecuária e desenvolvimento agrícola intensivo. O Sul com 6 % da água doce, é onde estão localizados os centros industriais e financeiros, com seus recursos hídricos sob uma relação muito desequilibrada oferta / demanda, devido ao consumo excessivo e à poluição das grandes áreas urbanas [7]. No Brasil, até 1960, mais do 50% da população brasileira vivia no campo. Nas últimas décadas, a situação se inverteu: Até o ano 2018, apenas 19% da população vivem no campo, enquanto 81% vivem em centros urbanos [8]. O crescimento demográfico e econômico do Brasil nos últimos anos utilizou os recursos hídricos além de sua capacidade de suporte tanto em quantidade como em qualidade. O desenvolvimento urbano brasileiro concentra-se em regiões metropolitanas, na capital dos estados e nas cidades pólos regionais. A expansão desordenada dos núcleos urbanos do país e a disponibilidade restrita dos recursos hídricos nas grandes cidades como São Paulo e Rio de Janeiro causam um problema no gerenciamento deste recurso.

Estas dificuldades fazem que o custo do litro de água seja variável em cada região e cidade porque uma das vias de transportar água até elas é por meio das tubulações. Estes são uma forma rápida e eficaz de transferir o fluido minimizando a evaporação. Pelas tubulações pode ser transportada desde o fundo da terra através do bombeamento ou desde terrenos elevados a terrenos baixos por gravidade. Estes sistemas de transporte têm custos de manutenção que têm que ser cobertos e afeta o preço final que tem que ser pago pelo consumidor. Por exemplo, de acordo com a Companhia Estadual de Águas e Esgotos do Rio de Janeiro (CEDAE), o consumo médio no estado do Rio de Janeiro é de 200 litros per capita por dia. Em 2017, a tarifa domiciliar saltou de R\$ 2,12 para R\$ 2,32 por metro cúbico [9]. A Cedae cobra tarifas progressivas de acordo com o volume gasto e com o tipo de consumidor. Essa é uma forma, segundo a empresa, de estimular o uso racional da água. Quem gasta mais paga mais. Para determinar quanto cada residência tem que pagar tem que ser medido o volume gasto. Este volume é determinado a partir da medição do fluxo. O fluxo é medido de duas formas: deslocamento e velocidade [9].

A vazão é a terceira grandeza mais medida na indústria, e atualmente as metodologias para medir-la são muito importantes, porque a maioria dos processos produtivos estão diretamente relacionados a essa grandeza. Desta forma, medir vazão com precisão torna-se necessário, para se determinar a quantidade real do produto transportado e comercializado estabelecendo assim seus preços finais, por exemplos, o consumo de água residencial, ou controle de combustíveis e de insumos em procedimentos realizados nas indústrias química e petrolífera. [10].

Quando se faz a escolha de um instrumento de medição de vazão, os parâmetros básicos a serem considerados, são: incerteza atingível, custo comparativo, uso específico, repetibilidade, custos de manutenção, custos operacionais, número de partes móveis, robustez, durabilidade, pressão e temperatura de operação, facilidade de instalação, remoção, e calibração [11].

Na indústria, tradicionalmente, a maioria dos métodos empregam instrumentos de medida em contato direto com o fluido, ou seja são invasivos, e, seus sensores precisam de manutenção e aferimento periódico. Para complicar esse problema, esses instrumentos são acoplados à equipamentos auxiliares, que requerem instalação e calibração, provocando paradas no processo e conseqüentemente com aumentos de custo. No entanto, as técnicas nucleares podem ser adequadas à realização da medida de vazão, se destacando principalmente os métodos que empregam radiotraçadores. Tais medidores cumprem com quase todos requisitos para a medida de vazão, ou seja, não tem partes móveis, independem da pressão do escoamento, são de fácil instalação e remoção, têm robustez e são relativamente econômicos.

O uso de radiotraçadores em inspeção não-destrutiva de processos constitui uma ferramenta com eficiência já comprovada, na indústria [12]. Das técnicas disponíveis para se medir vazão com radiotraçadores, a mais utilizada é a “Cross Correlation“:

Existem várias técnicas e instrumentos para medir a vazão de fluidos, entre estes tem-se a técnica de medição através do calculo da função de “Cross Correlation”. No campo da Estatística, a função “Cross Correlation” tem sido usada, há muito tempo, para estimar relações causa-efeito entre dois conjuntos de dados [13]. Esta técnica é indicada para uso em sistemas onde se requer determinar tempos de retardo para medir velocidades de escoamento tanto de fluidos quanto de materiais sólidos em suspensão.

Os medidores de vazão baseados na técnica de “Cross Correlation” determinam o tempo de trânsito entre sinais, por meio de um sistema de correlação, conhecido como “Correlator de Medição” (hardware) e a partir desse cálculo é finalmente obtido o tempo

de trânsito do fluido entre os dois pontos de medição. A grande vantagem de se empregar a metodologia de cálculo desta função “Cross Correlation” é por se tratar de um método absoluto, o resultado da vazão é calculado diretamente do registro da passagem do traçador em cada ponto de medição [13].

Apesar da metodologia com medidores de vazão baseada no cálculo da função “Cross Correlation” tenha feito muito sucesso quando foi adotada na indústria, na década dos 1950, os custos elevados dos correlacionadores eletrônicos (electronic correlators) e a dificuldade para o processamento de uma grande quantidade de dados inviabilizaram seu uso naquela época.

Atualmente, com os computadores ultra-rápidos disponíveis, as aplicações na Engenharia do método de “Cross Correlation” estão crescendo, porque se tornaram opções mais baratas e rápidas, permitindo às indústrias a obtenção de resultados em tempo real.

1.1 Revisão bibliográfica

Na primeira parte do trabalho é avaliado o correlator mediante simulação de sinais gaussianos e quadrados, com diferentes tempos de deslocamento. Na segunda parte são medidos os tempos de retardo τ , do deslocamento temporal de dois sinais, obtidos pela injeção de um radiotraçador à linha de água, num rango de vazões de $55,5 \times 10^{-3} \text{ L.s}^{-1}$ até $277,8 \times 10^{-3} \text{ L.s}^{-1}$

Em 1966, Komiya publicou o primeiro trabalho baseado no método que emprega a função de “Cross Correlation” para medir o tempo de retardo entre dois pontos num escoamento de um fluido. Ele mediu a turbulência na vazão com um anemômetro de filamento quente, pelas medidas das flutuações na velocidade de escoamento [14].

Em 1967, Beck e Plaskowski apresentaram uma descrição do uso das perturbações naturais nas medidas de vazão por “Cross Correlation”. Este trabalho foi patenteado pelos autores e é usado na Escola de Engenharia de Controle da Universidade de Bradford, na Inglaterra [13].

Em 1969, Beck apresenta na sua tese de doutorado os fundamentos teóricos para determinar vazão pelo cálculo da função de “Cross Correlation”, usando o ruído natural no escoamento [13].

Em 1970, Abeysekera e Beck desenvolveram um sistema para medir a velocidade

média de escoamento de água, entre dois pontos de uma tubulação, pelas variações de temperatura introduzidas no fluxo por meio de um pequeno elemento de aquecimento. A partir da mudança de temperaturas entre eles é determinado o tempo de retardo por meio da função de “Cross Correlation”. O sistema foi testado para um intervalo de fluxo no qual o número de Reynolds variou no intervalo $2000 < Re < 3000$. Os sensores usados foram termopares e a frequência de amostragem variou de 1Hz a 5Hz [15].

Em 1973, Coulthard usou transdutores de ultrassom para medir por “Cross Correlation” a vazão de um sistema bifásico líquido-gás. Não tem restrição na vazão e na precisão da medição é, em princípio, é independente da velocidade do som no fluido [16].

Em 1975, Ong fez uma aplicação dos transdutores de ultrassom para medir a vazão de líquidos e lamas em tubulações. No entanto, deve-se ajustar a frequência de transmissão do ultrassom para calcular a função de “Cross Correlation” adequadamente [17].

Em 1976, Olszowsk e Coulthard desenvolveram um medidor de velocidade ultrassônico por “Cross Correlation”, de um sistema bifásico gás-líquido. O dispositivo separa a fase gasosa e gera um fluxo quase homogêneo desta fase. A velocidade média do fluxo resultante é obtida pelo “Cross Correlation” das modulações de dois feixes ultra-sônicos paralelos, transmitidos através do tubo. A incerteza na velocidade deste sistema está entre 2 e 4% [18].

Em 1977, Bazerghi e Serdula desenvolveram um medidor de vazão ultrassônico pelo cálculo da função de cross correlation da propagação de heterogeneidades em líquidos com um desvio padrão de 2% e são comparados com os medidores convencionais gravimétricos. A incerteza deste medidor é de 2% [19].

Em 1978, B. Le Guennec e M. Alquier testaram um método para medir vazão baseado no cálculo da função de correlação das flutuações na concentração de uma mistura bifásica quando a sua densidade é medida por raios gama em duas seções diferentes do duto [20].

Em 1979, J. R. Jordan descreve neste artigo a teoria, as aplicações, implementação e medição industrial da função de “Cross Correlation”. A implementação do sistema para calcular a função de “Cross Correlation” é realizada através de circuitos microprocessadores [21].

Em 1980, K. R. Godfrey discutiu a teoria dos métodos de correlação, enfatizando o uso do “Cross Correlation” para determinar os pesos das funções dos sistemas lineares.

Deriva as expressões correspondentes no domínio de frequência e comenta várias aplicações em engenharia da função de “cross correlation” [22].

Em 1981, M.S. Beck publicou um artigo onde explica os princípios básicos da função de “Cross Correlation” e como pode ser usada no desenvolvimento de medidores de vazão industriais [23].

Em 1982, Lassahn e Baker desenvolveram um método para estimar a incerteza na localização do máximo da função de “Cross Correlation” quando é calculado o tempo de retardo em medidores de vazão. Quando aumenta a turbulência no fluido a incerteza na localização do pico é maior. O cálculo da função de “cross correlation” é feito por transformada de Fourier [24].

Em 1982, John P. Ianniello estimou a diferença de tempo de chegada de um sinal aleatório recebido por dois sensores, cada um dos quais também recebe ruído não correlacionado, examinando os efeitos em grandes e pequenos erros. Mostrou que, quando a pós-integração do sinal-ruído diminui, o “correlator” exibe um efeito de limiar; isto é, a probabilidade de um grande erro (uma estimativa anômala) aumenta rapidamente [25].

Em 1983, J. Coulthard apresentou um resumo das pesquisas e o desenvolvimento dos medidores de vazão baseados na aplicação da função de “cross correlation” em diferentes áreas industriais até esse momento e fez uma estimativa do que no futuro poderia ser feito com essa técnica [26].

Em 1984, C. Koppermann fez uma discussão dos erros sistemáticos nos medidores de vazão baseados no cálculo da função de “cross correlation” de um sistema teórico com sinais simulados. No trabalho mostrou que a velocidade medida pode ser maior ou menor do que a velocidade média, o que torna necessária a calibração [27].

Em 1984, Azaria e Hertz reexaminaram para vários tipos de sinais estacionários, os métodos de cálculo do transiente de tempo por “Cross Correlation”. Derivaram expressões para o erro quadrático médio (MSE) e mostraram que são similares aos obtidos em trabalhos anteriores para sinais gaussianos [28].

Em 1985, S.A. Jacobson, P.N. Denbigh e D.E. Naudé desenvolveram um medidor de vazão para fluidos abrasivos usando detectores de ultrassom e a função de cross correlation apresentando um método de desmodulação para evitar a deformação, degradação e inversão do sinal [29].

Em 1987, Beck e Plaskowski publicaram o livro “Cross Correlation Flowmeters - Their Design and Application”. Este livro contém todos os aspectos teóricos dos métodos de medição da vazão, dos diferentes tipos de detectores usados, assim como os diferentes métodos de cálculo da função de “cross correlation”. Eles fizeram um resumo dos trabalhos de pesquisa e desenvolvimento do “Cross Correlation” até o ano de 1987. No texto os autores apresentaram três modos de cálculo da função: Modo Normal, Modo Relay e Modo Polar [13].

Em 1988, M.I.A. Harba e F.A. Ali desenvolvem um algoritmo para o cálculo da função de “cross correlation” usando um microprocessador Z80 que mostra a capacidade e rapidez do cálculo deste circuito eletrônico por ser de 8 bits comentando seu possível uso em diversas áreas industriais[30].

Em 1992, Harba desenvolveu um correlator usando padrões binários de um conjunto de amostras sucessivas para calcular a função de “Cross Correlation” aplicando o modo Polar proposto por Beck e Plaskowski. O sistema correlator estima a frequência de ocorrência dos padrões binários e os salva em tabelas. Os coeficientes de correlação são calculados a partir destas tabelas. O sistema foi baseado no microprocessador Z80 [31].

Em 1993, Coulthard e Yan desenvolveram um medidor de fluxo baseado na determinação do transiente de tempo por “Cross Correlation” de vórtices gerados por um anteparo, quando estes se deslocam entre dois detectores ultra-sônicos [32].

Em 1994, J. Chen et al desenvolveram um correlator em modo polar para ser aplicado na indústria de papel para a medição do fluxo bifásico. O correlator digital tem pré-retardo de comprimento variável baseado em um microprocessador [33].

Em 1995, K. Jambunathan e colaboradores, apresentaram um algoritmo melhorado de “Cross Correlation” baseado no gradiente de velocidade das partículas por deslocamento, rotação e cisalhamento, conhecido como fluxos bi-axiais e de re-circulação, que é aplicado no calor de convecção de um cilindro horizontal pré-aquecido [34].

Em 1997, Yang e Beck propuseram um “correlator” inteligente (intelligent cross correlator) para medir a velocidade de escoamento do fluido em uma tubulação. O correlator funciona no modo Polar devido a sua simplicidade, mas ao custo da perda de informação comparado como modo Direto de operação. O sistema faz a escolha automática do tipo de transdutor, frequência de amostragem e ganho, além de usar interpolação na função de “Cross Correlation” para melhorar a incerteza. Segundo estes autores eles conseguem uma incerteza de 1% no tempo de retardo [35].

Em 1997, Xiaodong, Zhenxi e Jijun desenvolveram um sistema digital para medir vazão a partir da medição da função de “Cross Correlation” das flutuações de temperatura que existem naturalmente no escoamento de um fluido [36].

Em 1998, A. Worch apresentaram uma possibilidade de medir a taxa média de fluxo no escoamento de fluidos através dos tubos calculando a função de cross correlation entre dos sinais produzidos por flutuações naturais no fluido e detectadas por dois sensores ultra-sônicos separados a uma distância conhecida sem o uso de anteparos para gerar as perturbações [37].

Em 1999, X. Lai e H. Torp mediram o transiente de tempo através da função de cross correlation e 4 métodos novos de interpolação parabólica para melhorar a precisão das medições da velocidade do sangue. Os métodos foram analisados com sinais simulados por computador e com sinais de Radio-frequência registradas em um paciente, para transientes de tempo maiores que $1/f_0$, sendo f_0 a frequência central [38].

Em 2000, Giroud, Palmer e Dove propuseram uma relação direta entre a velocidade média do fluxo e a vazão nas tubulações. Segundo os autores, esta é a primeira vez que tal relação direta é proposta. O método clássico para determinar a velocidade média do fluxo em tubulações como uma função da vazão é baseado nas equações de Manning, que é um método que requer um processo iterativo ou o uso de tabelas ou gráficos complicados. Eles apresentam a derivação da equação e seu uso prático. Compararam as vazões calculadas usando a equação proposta e as vazões calculadas usando o processo iterativo e mostram a precisão obtida mesmo quando a vazão é muito pequena comparada com a vazão máxima do tubo [39].

Em 2002, A. Godley apresenta um relatório técnico com as várias opções disponíveis comercialmente no mercado para medição de vazão em condutos parcialmente preenchidos. As técnicas abrangidas incluem métodos volumétricos, métodos de traçadores e diluição, uso de estruturas hidráulicas de medição, Doppler, ultrassom, métodos eletromagnéticos, métodos de inclinação de área [40].

Em 2003, D. Ruan e colaboradores combinam inteligência artificial (análises de ruído, redes neurais artificiais, sistemas fuzzy) com sistemas de medição tradicional de vazão e com cross correlation [41].

Em 2014, E. Avilán apresentou sua dissertação de mestrado intitulada “Medidas de Vazão usando Espalhamento de Radiação Gama e a Técnica de Cross Correlation”. Neste

trabalho foi desenvolvido um sistema Correlator, para medir o tempo de retardo entre dois sinais deslocados com respeito ao tempo por meio do cálculo da função de “Cross Correlation”, pelos métodos Ponto a Ponto e Evolutivo no modo de operação Direto. A partir da medida do tempo de retardo finalmente foi determinada a vazão de uma linha de transporte de água experimental. O sistema de detecção consiste de dois detectores cintiladores de NaI(Tl) separados axialmente por um comprimento “L” ao longo da linha.

Em 2004, S. Takashima e colaboradores apresentaram um medidor de vazão por “Cross Correlation” com sensores de grade de Bragg. O sistema é imune à interferência eletromagnética. Para medir vazão de água, o sistema é linear até 1 m/s com velocidade mínima detectável de 0,05 m/s [42].

Em 2005, Arattano e Marchi apresentaram um trabalho intitulado: Medição da velocidade de fluxo de Debris usando a função de “cross correlation”. No trabalho eles testaram diferentes tipos de detectores de ultrassom e mediram a velocidade para diferentes valores da distancia entre os sensores [43].

Em 2008, P. D. Lysak e colaboradores desenvolveram um modelo analítico de medidor ultrasônico de vazão por cross correlation que relaciona o tempo de retardo do perfil de velocidade e as propriedades estatísticas da turbulência na vazão no duto [44].

Em 2009, Sung-Hee Jung e colaboradores mediram vazão em uma tubulação com fluxo bifásico usando duas fontes radioativas seladas e a técnica de “Cross Correlation”. Um fluxo de nitrogênio é injetado periodicamente a pressão em um tubo acrílico cheio de água de 8cm de diâmetro. A idéia de injetar nitrogênio é para determinar a velocidade de escoamento desse gas na água. A distancia de separação das fontes é 4 vezes o diâmetro do tubo e a taxa de amostragem dos dados é de 4ms. O error relativo na vazão das medições para essas condições experimentais é de 1.7% [45].

Em 2010, C. Fernandes e colaboradores propuseram um medidor de vazão óptico baseado na técnica de “Cross Correlation”. A medição é feita por meio de dois raios laser paralelos que passam através de um tubo transparente pelo qual escoam um fluxo de ar turbulento. Os raios laser são detectados por dois sensores de luz e o tempo de retardo entre os sinais é obtido por meio desta técnica [46].

Em 2010 N. Shafiza e F. Ghani apresentaram uma nova técnica usando a Transformada de Hilbert da “Fast Fourier Transform” da função de cross correlation cortada para melhorar a precisão das estimativas do transiente de tempo, em sinais de baixa relação sinal ruído. A técnica foi testada com sinais simulados tentando simular a situação real.

Em cada teste foram simulados dois sinais e os parâmetros de entrada são especificados variando a relação sinal ruído, “Signal Noise Ratio” em inglês, para cada caso [47].

Em 2013, Gajewski apresentaram uma discussão dos erros na precisão da medição de vazão em sistemas sólido-gás causados pela frequência de amostragem dos sistemas eletrônicos que detectam partículas carregadas eletrostaticamente por sensores de indução eletromagnética. Nestes sistemas o transiente de tempo entre os sensores é determinado através do cálculo da função de cross correlation [48].

Em 2014, R. Hanus e colaboradores aplicaram tecnologia nuclear para medir a velocidade da fase sólida de um sistema bifásico. A velocidade é medida por um sistema composto de duas fontes seladas de ^{241}Am e dois detectores de NaI(Tl). A velocidade da fase sólida é determinada em uma tubulação vertical pela qual escoam bolhas de cerâmica de tamanhos diferentes e o transiente de tempo entre o sinal em cada detector é determinado pelo cálculo da função de cross correlation. A incerteza relativa da velocidade de escoamento da fase sólida calculada por cross correlation é de 3.0% [49].

Em 2015, B. Shi e colaboradores desenvolvem um algoritmo para medir a velocidade de partículas de baixa densidade, bolhas de ar e de partículas de alta densidade, separadamente. Eles combinaram a metodologia de medição de velocidade de partículas por imagem, “Particle Image Velocimetry” (PIV) com o cálculo da função de “Cross Correlation”. O algoritmo é testado experimentalmente e os resultados foram comparados com um sistema simulado computacionalmente [50].

Em 2016, Y. Jian, B. Li e J. Chen estudaram a distribuição da vazão em um tubo cilíndrico parcialmente preenchido. O perfil de velocidade é diferente do fluxo em tubos cheios, já que o fluxo é impulsionado pela gravidade e não por um sistema de bombeamento externo. Mostraram que a posição do fluxo máximo varia com a profundidade da água. Na região próxima à parede do tubo, a velocidade do fluido é influenciada principalmente pelo atrito da parede e pelo declive do fundo do tubo, e a variação de velocidade é semelhante à do tubo cheio. Apresentaram uma expressão de distribuição de velocidade bidimensional (2D) para um tubo cilíndrico parcialmente preenchido baseado no princípio da máxima entropia do fluido [51].

Em 2017, A. Soud e colaboradores descreveram como aplicar a técnica de Tomografia computadorizada de capacitância elétrica “Electrical Capacitance Tomography”(ECT), para estimar a velocidade em caso de fluxo multifásico de redemoinho. Um modelo físico é usado para simular o fenômeno de redemoinho e gerar sequências de imagens 2D (imagens planas). O cálculo da função de “Cross Correlation” dos sinais de duas imagens

permite determinar a velocidade de escoamento de um sistema bifásico sólido-gas [52].

1.2 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é desenvolver uma metodologia para medir vazão com baixa incerteza que permita aferir medidores de vazão em dutos de transporte de água pela técnica de cálculo da função de “Cross Correlation”.

Para tal, será necessária a realização das seguintes etapas:

- i. Caracterização da geometria de contagem (colimação dos detectores).
- ii. Desenvolvimento de um novo “correlator” (sistema de medida + software) com funções especiais (filtragem + interpolação) no cálculo da função de “Cross Correlation” na determinação do transiente de tempo e minimizar incerteza da medida.
- iii. Validação do correlator com dados teóricos e experimentais.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Vazão

A água é vendida em termos do volume total consumido por meio de um medidor de vazão, durante um período conveniente de tempo, por exemplo, metros cúbicos (m^3) consumidos em um mês. Muitos destes medidores possuem capacidade integrada para totalizar o volume continuamente. Sendo o volume consumido obtido pela diferença de duas leituras mensais sequenciais. Existem também muitos medidores que fornecem uma taxa instantânea de vazão que é exibida em unidades, como metros cúbicos por segundo ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). Essas vazões são usadas para prever o volume de água que será consumido durante os intervalos de tempo pré-estabelecidos [53]. Assim, a vazão pode ser determinada com precisão medindo o tempo, t , para preencher um volume conhecido, V_0 , ou seja:

$$Q = \frac{V_0}{t} \quad (2.1)$$

A vazão é definida como a quantidade de fluido (por exemplo, o fluido pode ser líquido ou gás) que desloca pela seção reta de um duto, por unidade de tempo. Geralmente os instrumentos só medem vazão de fluidos homogêneos e monofásicos, porém existem instrumentos para medir vazão em sistemas multifásicos não homogêneos como no caso de escoamento óleo/água/gás existentes em poços de petróleo.

A vazão depende principalmente de: O atrito ou resistência ao escoamento causado pelo comprimento do duto, a rugosidade do duto, as curvas, as restrições, as mudanças na forma e tamanho dos dutos, a natureza do fluido que escoar e da seção transversal do duto.

2.2 Escoamento de fluidos e o *Número de Reynolds*

O escoamento de um fluido real é muito complexo e a sua viscosidade é responsável pelas forças de atrito entre as partículas fluidas, bem como entre estas e os contornos sólidos de uma tubulação. O escoamento ocorre, devido ao trabalho realizado contra estas forças, onde parte da energia mecânica se transforma em calor. Os fluidos podem escoar

de dois modos diferentes, que são denominados regimes de fluxo, e foram inicialmente estudados por Osborne Reynolds em 1883, [54].

Um dos principais parâmetros de controle em todos os fluxos viscosos é o número de Reynolds “Re”, adimensional, usado para determinar se o escoamento do fluido é laminar ou turbulento. Embora o número de Reynolds compreenda as propriedades estáticas e cinemáticas dos fluidos, ele é especificado como uma propriedade de fluxo, uma vez que as condições dinâmicas são investigadas. Tecnicamente, o número de Reynolds é a razão entre as forças inerciais e as viscosas. Se as forças inerciais são dominantes, o fluxo é turbulento. De outra forma, se as forças viscosas são dominantes, definidas como a resistência ao fluxo, é laminar.

$$Re = \frac{F_{inercial}}{F_{viscosa}} = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} \quad (2.2)$$

Onde:

- ρ : Massa Específica (Kg.m^{-3})
- v : velocidade (m.s^{-1})
- D : Diâmetro Interno (m)
- μ : Viscosidade Dinâmica ($\text{Kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$)

2.2.1 Tipos de Escoamento

1. **Regime Laminar:** Se Re for menor que 2300 e se o duto por onde escoar o fluido tiver comprimento suficiente para alcançar um estado estacionário, tudo se move paralelo ao eixo do tubo. Se o fluido “adere” à parede do duto ocorre uma condição antiderrapante, ou seja, a velocidade do fluido aumenta de zero na parede do duto até um máximo no seu centro, formando um perfil parabólico.
2. **Regime Transicional:** Se $2300 < Re < 4000$, entre os fluxos turbulento e laminar ocorre uma transição quando o fluxo se alterna aleatoriamente, no espaço e no tempo.
3. **Regime Turbulento:** Acima de $Re = 4000$, ocorrem mudanças importantes: a natureza suave e paralela do fluxo se transforma em redemoinhos. Esses turbilhões misturam-se à altas velocidades no eixo da tubulação com a menor velocidade próxima à parede do tubo. O perfil resultante é mais plano, embora velocidade do fluido seja zero na parede do tubo. As grandezas do número, Re , para os quais os fluxos mudam entre um e outro regime estão resumidas na Figura 2.1.

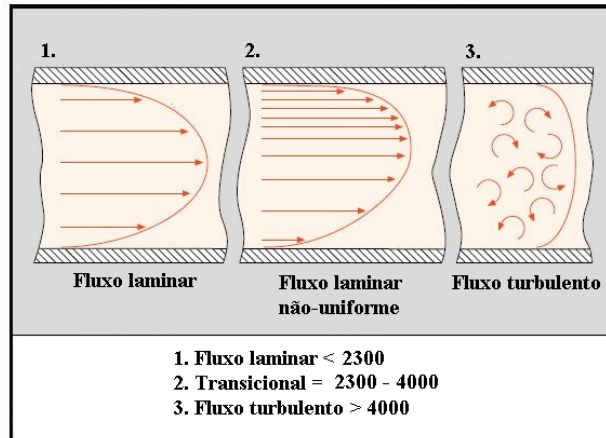


Figura 2.1: Perfil do fluxo para cada um dos três regimes

2.3 Medidores de Vazão

Os tubos transportam a água (pode ser água superficial de um lago, canal ou lençol freático de um poço) de um sistema alimentado por bomba ou por gravidade. Os métodos de medição de vazão para tubulações podem ser simples, ou mais complexos usando vários tipos de medidores de vazão ou traçadores. Todos os métodos discutidos abaixo atendem aos padrões de precisão apresentados em [53], e podem ser usados para medições de vazão e calibração de um dispositivo de medição de vazão primária. Um medidor de vazão ideal pode ser definido da seguinte forma: [55]

Grupo de componentes ligados que fornecerão um sinal exclusivamente relacionado à taxa de fluxo ou quantidade de fluido que escoar em um duto por unidade de tempo.

Um medidor de vazão tem que apresentar o valor dessa grandeza assim como a sua incerteza, $Q \pm \Delta Q$. O valor de ΔQ , depende da escala na qual foi feita a medição. A maioria dos medidores, medem a vazão indiretamente e são comumente classificados naqueles que detectam ou medem a velocidade, pressão ou altura. Em seguida, tabelas ou equações são usadas para obter a vazão. Existem métodos diferentes para medir a vazão, tendo cada um suas características específicas, que deverão ser direcionados de forma a cumprir os requisitos individuais da instalação. Os medidores de vazão podem ser divididos em dois grandes grupos [56]:

1. **Medidores de vazão volumétrica:** A vazão, Q , representa a quantidade de volume de um fluido em uma tubulação por unidade de tempo e é usualmente dada em $L \cdot s^{-1}$ ou $L \cdot h^{-1}$. No caso dos fluidos compressíveis é necessário especificar as condições de pressão e temperatura, por exemplo, $m^3 \cdot s^{-1}$ ($20^\circ C - 760 mmHg$)
2. **Medidores de vazão mássica:** a taxa de fluxo de massa, W , representa a quantidade

de massa de um fluido em qualquer instante de tempo. Medindo, Q , e conhecendo a densidade, ρ , é possível determinar a taxa de fluxo de massa a traves da relação:

$$W = Q \cdot \rho (Kg.s^{-1}) \quad (2.3)$$

Na Figura 2.2, são mostrados os medidores de quantidade e de vazão instantânea disponíveis no mercado [57].

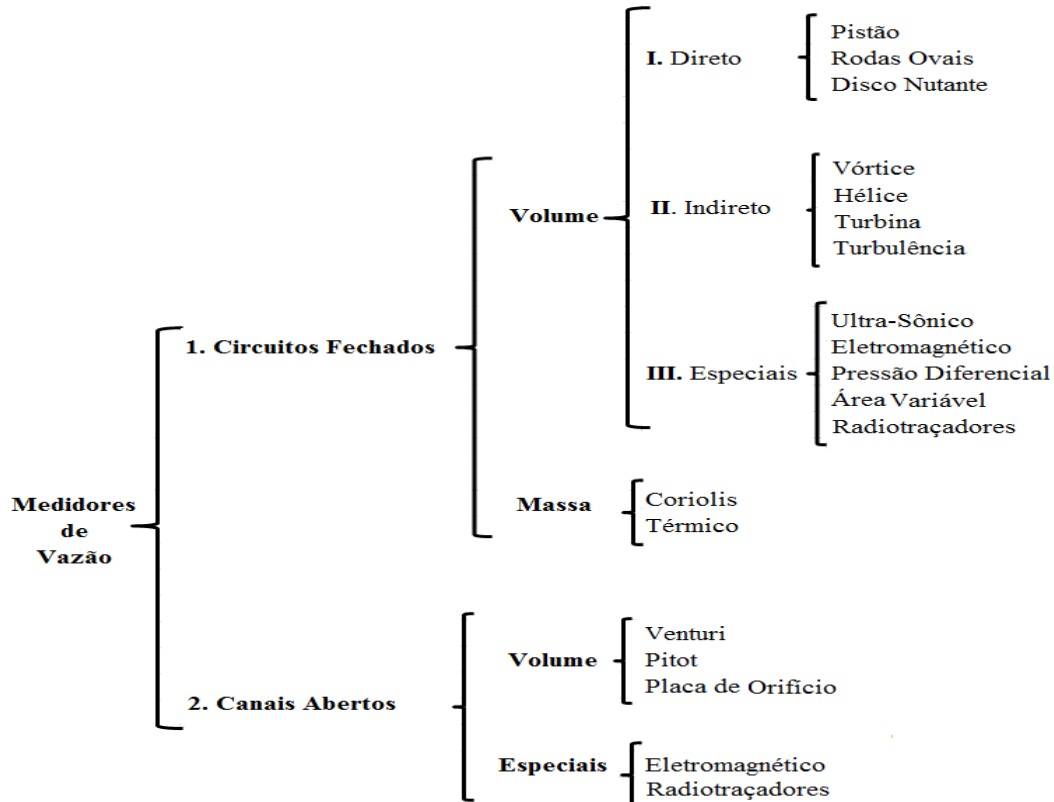


Figura 2.2: Medidores de vazão disponíveis no mercado

2.3.1 Medidores de Tipo Mecânico

Os medidores de vazão que possuem partes móveis são conhecidos como mecânicos, alguns deles são mencionados na figura 2.2 e para sua instalação têm que ser considerados os seguintes fatores [53]:

1. Distância do medidor à bomba
2. As uniões na tubulação

3. A curvatura da tubulação precisa ser pelo menos 10 vezes maior do que o diâmetro do duto
4. Fluxo uniforme

Se todas estas características são consideradas, a precisão deste tipo de instrumento é, geralmente, ao redor de $\pm 2\%$

2.3.2 Medidores de Tipo Pressão Diferencial

São medidores que não têm partes moveis e a medição da vazão depende da queda de pressão e da seção transversal da tubulação. A precisão destes medidores depende das seguintes características, conforme a ‘South Florida Water Management District’ (SFWMD):

- As tubulações têm que estar completamente cheias e sob pressão
- O medidor precisa estar suficientemente distante da bomba
- As uniões e as curvaturas da tubulação devem ser pelo menos 10 vezes maiores do que o diâmetro do duto

As precisões destes dispositivos respeitando as condições acima mencionadas são:

- De venturi $\pm 1\%$
- De placa de orifício desde $\pm 2\%$ a $\pm 4\%$
- Bocal desde $\pm 1\%$ a $\pm 2\%$

Esses medidores de vazão perdem a precisão quando usados em sistemas que fluem a uma pressão mais baixa do que a faixa de operação recomendada pelos fabricantes. As vazões medidas por estes dispositivos são confiáveis, exceto em casos onde ocorra acumulação de detritos obstruindo o escoamento do fluido. Um exemplo deste tipo de medidor é o tubo de Pitot que consiste em um tubo dobrado em um ângulo reto que, quando submerso com a parte dobrada aberta em direção ao fluxo, fornecerá uma medição direta da altura total conforme a figura 2.3.

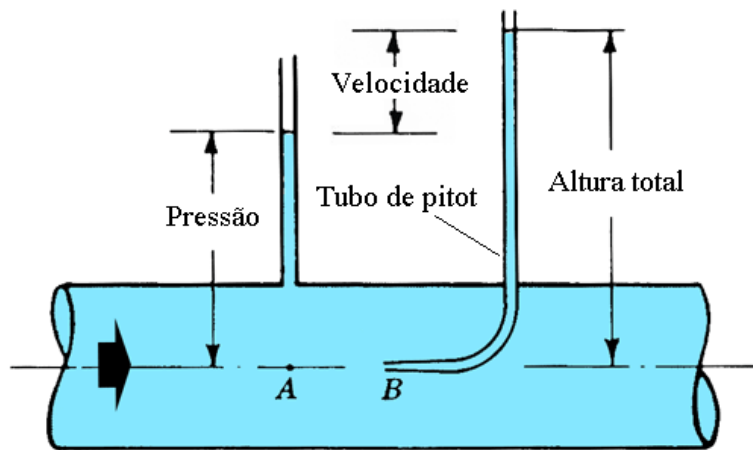


Figura 2.3: Tubo de pitot

2.3.3 Medidores de Vazão por Ultrassom

Úteis para monitoramento contínuo da vazão, medem o tempo de trânsito por efeito Doppler, ou seja, por meio da mudança da frequência entre o sinal da fonte e o sinal de retorno refletido nas partículas sólidas ou bolhas em movimento no fluxo. O deslocamento na frequência entre os sinais transmitidos e detectados é diretamente proporcional à velocidade do fluxo. Estes medidores requerem que a tubulação esteja totalmente preenchida e em regime de escoamento laminar para operar satisfatoriamente. São muito sensíveis às mudanças de densidade e temperatura, por isso não são recomendados para medições de alta precisão.

2.3.4 Medidores de Vazão por Acústica

O princípio de operação baseia-se no tempo de viagem do sinal sonoro na direção do fluxo até o receptor que depende da velocidade do fluxo. O transmissor e o receptor são colocados em lados opostos de um duto em um ângulo de aproximadamente 45 graus em relação à direção do fluxo. O tempo de viagem no sentido contrário ao fluxo é mais lento do que o tempo no sentido do fluxo. Usando a diferença nos tempos de viagem do sinal, a velocidade média é calculada. A vantagem deste medidor é que não precisam de partículas no fluido, mas por outro lado são muito mais caros do que aqueles baseados em ultrassom.

2.3.5 Medidores de Vazão Eletromagnéticos

Os medidores de vazão eletromagnéticos consistem em uma seção de tubulação não magnética e não elétrica com duas bobinas magnéticas colocadas em lados opostos da seção de tubulação. Dois eletrodos são montados em lados opostos do duto em um plano perpendicular às bobinas magnéticas. À medida que, o fluxo passa pelo medidor, os

eletrodos captam uma tensão elétrica diretamente proporcional à velocidade do fluxo. O sinal é amplificado e transformado em medições de fluxo e volume. Estes medidores possuem uma precisão de $\pm 1\%$ da faixa operacional nominal quando instalados e usados de acordo com as especificações do fabricante.

2.3.6 Medida de Vazão usando Radiotraçador pelo Método “Cross Correlation”

Quando um radiotraçador é injetado num fluido que escoar em um duto, a passagem da nuvem radioativa por dois detectores é registrado. Por meio do método da função de “cross correlation” é possível calcular a vazão pela determinação do tempo de retardo do sinal entre os dois detectores: se $x(0,t)$, é o sinal no detector 1, e $y(L,t)$, é o sinal medido no detector 2, veja a Figura 2.4.

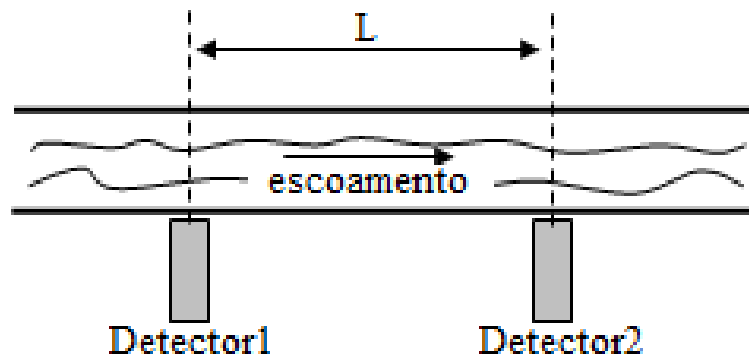


Figura 2.4: Geometria para medir a vazão por “Cross Correlation”

Se o tempo transcorrido pelo fluido para passar pelo detector 1 e o detector 2 é, τ , então, $x(0,t)$ e $y(L,t)$ pode-se relacionar pela equação 2.4:

$$y(L,t) = x(0,t - \tau) \quad (2.4)$$

A função de “Cross Correlation” $R_{xy}(L, \tau)$ entre $x(0,t)$ e $y(L,t)$ é obtida pela relação, [13]:

$$R_{xy}(L, \tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(0,t - \tau)y(L,t) dt \quad (2.5)$$

O tempo de retardo, também pode, ser estimado por meio do máximo do coeficiente normalizado da função de cross correlation, conforme a equação 2.6 [13]:

$$\rho_{xy}(\tau) = \frac{R_{xy}(\tau)}{\sqrt{R_{xx}(0)R_{yy}(0)}} \quad (2.6)$$

Onde:

$R_{xx}(0)$ e $R_{yy}(0)$: são as funções de autocorrelação.

Uma das maiores vantagens de se-usar o método de “Cross Correlation” é que qualquer sinal de ruído ou interferência no sistema é rejeitado. A função $R_{xy}(L, t)$ terá um valor máximo quando o tempo de retardo “ τ ”, for igual ao tempo de trânsito “ τ' ” que é o tempo de deslocamento do sinal do primeiro detector em relação ao segundo. Assim a velocidade do fluido pode ser calculada pela equação 2.7:

$$v = \frac{L}{\tau'} \quad (2.7)$$

onde:

L : separação entre os detectores,

τ' : tempo correspondente ao máximo valor da função $R_{xy}(L, \tau)$, também conhecido como tempo de retardo.

Se o perfil da velocidade é uniforme na secção transversal da tubulação, então a vazão, “ Q ”, pode ser calculada a partir das relações 2.8 e 2.9:

$$Q = \frac{A.L}{\tau} \quad (2.8)$$

Ou simplesmente:

$$Q = vA \quad (2.9)$$

Onde:

v : velocidade,

A : seção transversal do tubo.

A incerteza padrão combinada da vazão é avaliada pela expressão 2.10:

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \sqrt{\left[\left(\frac{\Delta A}{A}\right)^2 + \left(\frac{\Delta L}{L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \tau}{\tau}\right)^2\right]} \quad (2.10)$$

Na prática a função de “Cross Correlation” tem que ser modificada por uma forma mais simples e discreta como é apresentada na equação 2.11 [13] [58].

$$R_{xy}(j\Delta t) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_n y_{n+j} \quad j=0,1,2,\dots,J \quad (2.11)$$

Onde:

N : é o número total de dados

j : é um parâmetro conhecido como a janela que indica o número de dados usados em cada operação

$x_n = x(n\Delta t)$: sinal registrado pelo Detector-1;

$y_n = y(n\Delta t)$: sinal registrado pelo Detector-2;

Δt : é o intervalo de tempo entre contagens, ou seja, taxa de amostragem

A solução da equação 2.11, pode ser obtida por dois métodos: Ponto a ponto e Evolutivo. Estes métodos foram analisados na dissertação de mestrado: Medidas de Vazão Usando Espalhamento da Radiação Gama e a Técnica de “Cross Correlation” [58] e no livro [23]:

A forma de fazer uma estimativa inicial do intervalo de tempo que consta na equação 2.11 é demonstrada por meio da equação 2.12.

$$\Delta t = \left(\frac{2.L}{v_{max}}\right) \cdot \left(\frac{\Delta v}{v_{max}}\right) = \frac{2L \cdot \Delta v}{v_{max}^2} \quad (2.12)$$

onde

- L : separação dos detectores (m)

- v_{max} : velocidade máxima ($m.s^{-1}$)
- Δv : incerteza requerida na velocidade ($m.s^{-1}$)

Por exemplo, usando a equação 2.12, dependendo do valor da vazão e a separação entre os detectores é possível estimar a grandeza inicial de Δt atingindo a incerteza requerida na medição. A incerteza na medição da vazão é comumente expressa como usado na equação 2.13, [53]:

$$\Delta Q\% = \left(\frac{Q_{(dispositivo-testado)} - Q_{(dispositivo-secundario)}}{Q_{(dispositivo-secundario)}} \right) * 100 + \Delta Q\%_{(dispositivo-secundario)} \quad (2.13)$$

Na tabela 2.1, apresentam-se as incertezas de alguns dos medidores disponíveis no mercado:

Tabela 2.1: Tabela de Incertezas para Alguns dos Dispositivo de Medição de Vazão

Tipo	Classe	Faixa de Incerteza (%)
Pressão Diferencial	Placa de Orifício	2 - 4
	Bocal	1 - 2
	Venturi	1 - 2
Mecânico	Rotâmetro	2
	Turbina	2 - 5
	Vórtice	1
Especiais	Ultrassônico	1 - 5
	Eletromagnético	1
	Radiotraçadores(Cross-Correlation)	1

2.4 Medidores de Fração de Volume

Quando se tem dois ou mais fluidos de diferentes densidades como, por exemplo, misturas de água e ar, e precisa-se conhecer a fração de volume de cada uma das fases são usados diferentes métodos ou instrumentos. Dentre os instrumentos que existem para medir a fração de volume têm-se os densitômetros de raios gama.

2.4.1 Densitômetros de raios gama

Um densitômetro é um dispositivo baseado na atenuação do feixe de radiação gama transmitido ao atravessar um meio, desta forma pode-se estimar a fração de volume das fases aproveitando a diferença de densidades dos materiais que o compõem. Ao conhecer a fração de uma componente também é possível obter a outra. Na Figura 2.5 é apresentado um densitômetro de feixe simples. Neste caso, a forma de calcular a fração de volume é pelo coeficiente de atenuação linear no volume medido na seção transversal do duto. O resultado obtido com este densitômetro depende da vazão, pois o volume da seção transversal depende área coberta pela seção transversal do duto.

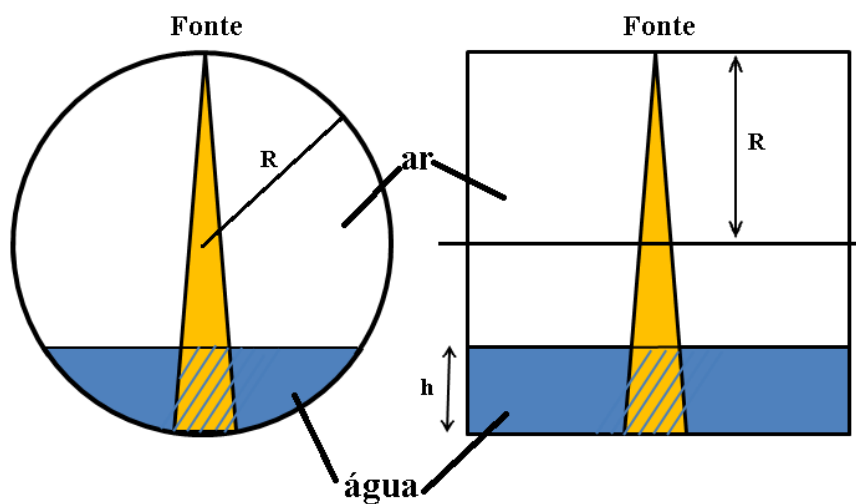


Figura 2.5: Geometria de medida com densitômetro usando feixe estreito de radiação em fluxo laminar: a) Vista frontal b) Vista lateral.

Por exemplo, a fração volume do ar é definida pela fração de volume definida pelo cone formado pelo feixe de radiação e pela área vista pelo detector na fase aquosa, conforme pode ser observado na Figura 2.5. Como o volume varia com o regime de fluxo, a precisão da medição é diferente para cada caso. Quando o fluxo é homogêneo, o coeficiente de atenuação linear é constante para toda a seção transversal, então, medir o coeficiente de atenuação em um ponto qualquer axialmente em relação ao duto é suficiente para determinar a fração de volume. Para a configuração coplanar fonte-detector apresentada na Figura 2.5 em fluxo laminar. O cálculo da fração de volume de ar considerando um feixe de radiação estreito (pencil-beam) é dada pela equação 2.14

$$\alpha = \frac{(2R - H)^3}{8R^3} \quad (2.14)$$

Quando o diâmetro do tubo é muito maior que o diâmetro do detector, o feixe da fonte e do detector pode ser considerado como se fossem paralelos. Neste caso, não há

diferenças de configurações se a fonte está localizada acima ou abaixo do duto e a fração de volume (α) de ar é fornecida pela equação 2.15.

$$\alpha = 1 - \frac{H}{2R} \quad (2.15)$$

Considerando esta aproximação é possível determinar a altura H do nível da água no interior do duto parcialmente preenchido e a partir daí, pode-se determinar o volume por meio da equação 2.16.

$$V = A.L \quad (2.16)$$

Onde:

- A: é a área da seção transversal preenchida pela água, conhecida também como área úmida
- L: é o comprimento do duto
- H: é a altura do nível da água no interior do duto
- R: é o raio do duto

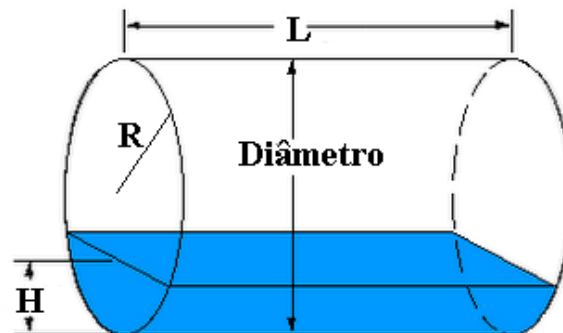


Figura 2.6: Representação esquemática de tubo parcialmente preenchido

A partir desses dois últimos parâmetros é possível calcular a área úmida para determinar o volume parcialmente preenchido. A equação 2.17 permite calcular a área úmida.

$$A = \frac{\pi.R^2}{2} + R^2.\arcsen\left(\frac{H-R}{R}\right) + (H-R).\sqrt{2.R.H-H^2} \quad (2.17)$$

2.5 Métodos de Medição de vazão em Tubulações

Nos casos onde a tubulação está parcialmente preenchida existem métodos específicos para medir a vazão em tubulações, conforme a lista a seguir:

1. Método Califórnia
2. Método de Purdue
3. Método de Manning
4. Método de Traçadores em Tubulações com Acúmulo de Detritos Sólidos

2.5.1 Método Califórnia

Ele é particularmente adaptado para medir vazão em dutos de diâmetros pequenos e de seção transversal circular. O método é apresentado na Figura 2.7

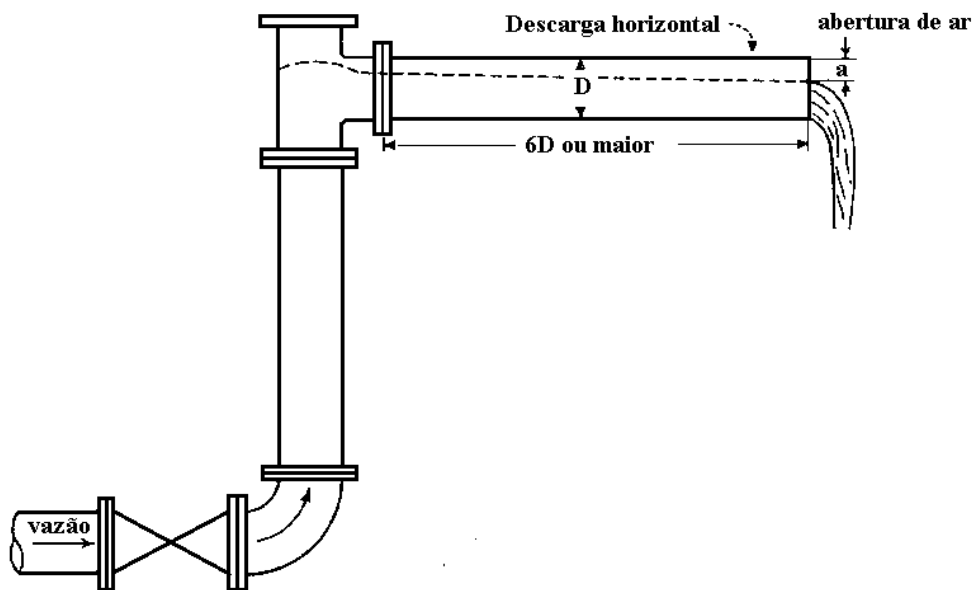


Figura 2.7: Método Califórnia para dutos parcialmente preenchidos

O duto deve estar completamente horizontal por pelo menos $6D$ (D = diâmetro do duto) a descarga do fluido deve sair livremente da extremidade do duto e ser a jato (excessivamente enérgica). Se o duto estiver quase cheio, deve-se colocar uma ventilação na saída dele para garantir a livre circulação do ar na parte não preenchida. Os únicos parâmetros necessários são o diâmetro interno do duto e a distância vertical entre o interior do duto e a superfície da água medida a partir do interior do topo do duto. O método foi desenvolvido experimentalmente para dutos de 3 a 10 polegadas [7,62 - 25,4 cm] de

diâmetro. A equação para o cálculo da vazão pelo método Califórnia foi derivada empiricamente no ano 1922 por B.R. Van Leer [53]:

$$Q = K \left[1 - \frac{a}{D} \right]^{1,88} \cdot D^{2,48} \quad (2.18)$$

- Q: vazão (m^3/s)
- a: distância do interior do tubo até a superfície da água (medida no final do duto)(m)
- D: diâmetro do duto (m)
- K = 4,685

O Método Califórnia não pode ser aplicado em dutos cujo nível seja maior que 0,5D (D: é o diâmetro do duto) nesse caso tem que ser usado o Método Purdue.

2.5.2 Método de Purdue

O método Purdue aplica-se igualmente para dutos total e parcialmente preenchidos. Quando a profundidade da borda é maior que 0,5D, o método de Purdue desenvolvido no ano 1928 deve ser usado em vez do método Califórnia [53]

O método de Purdue consiste em medir as coordenadas da superfície superior do jato, conforme mostrado na Figura 2.5.2 a). Se a água no tubo flui para uma profundidade abaixo de 0,8 D na saída, a distância vertical, Y, pode ser medida no final do duto onde X = 0.

A forma do jato em um duto horizontal pode ser interpretada de acordo com o movimento de um projétil, Figura 2.5.2 b). De acordo com este princípio, assume-se que a componente horizontal da velocidade do fluxo é constante e que a única força que age no jato é a gravidade. No tempo t, uma partícula na superfície superior do jato viajará horizontalmente a distância X da saída do tubo igual a: $X = v_0 \cdot t$; onde v, é a velocidade no ponto em que X = 0. Ao mesmo tempo t, a partícula vai cair uma altura vertical igual a: $Y = \frac{1}{2} g \cdot t^2$

Para esse método de medição de vazão (Q) é calculado pela equação 2.19:

$$Q = \frac{C_d \cdot \pi \cdot D}{4} \sqrt{g \cdot \frac{X^2}{2Y}} \quad (2.19)$$

- Q: Vazão (m^3/s)
- D: Diâmetro duto (m)
- X: Distância horizontal(m)

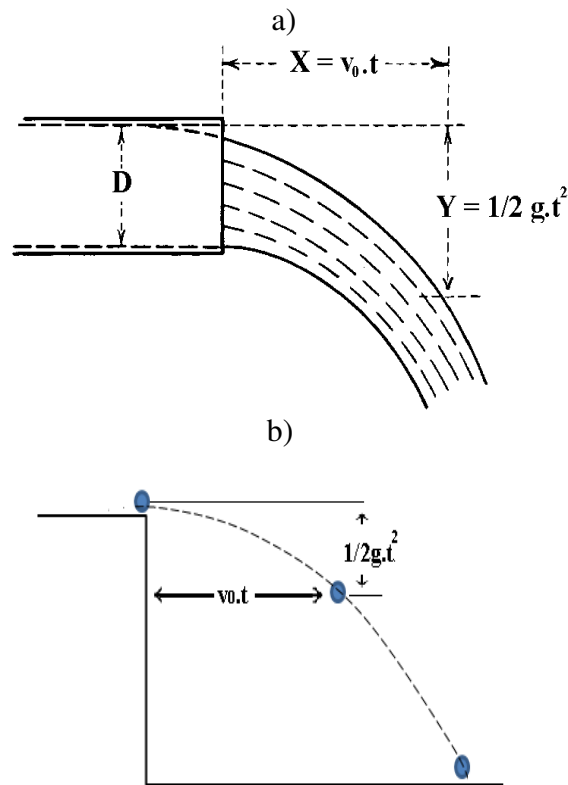


Figura 2.8: Parâmetros utilizados pelo método de Purdue: a) Saída do jato na extremidade do duto; b) Arremesso de um projétil

- Y: Distância vertical (m)
- $C_d = 1,10$; constante

2.5.3 Método de Manning

A equação de Manning (USA) é uma fórmula derivada empiricamente que fornece a vazão e a velocidade média do fluido em funções do nível de líquido presente na tubulação, conforme figura 2.9. Essas equações incluem funções trigonométricas, o que torna impossível obter rigorosamente uma relação direta entre a vazão e a velocidade média do fluxo. A fórmula usa a velocidade média da seção transversal, o raio hidráulico, o coeficiente de rugosidade e a inclinação do duto. Uma representação do modelo matemático que se baseia neste método é apresentada na figura 2.10. A equação é usada para medir o fluxo em locais onde a construção de uma estrutura hidráulica não é prática. Grande parte da dificuldade em usar esta equação é determinar o coeficiente apropriado de Gauckley-Manning-Strickler (Europa), n , a ser aplicado. A equação de Manning pode ser usada para medir vazão contínua [39].

Segundo o método de Manning, a velocidade média do fluxo pode ser calculada usando a equação 2.20.

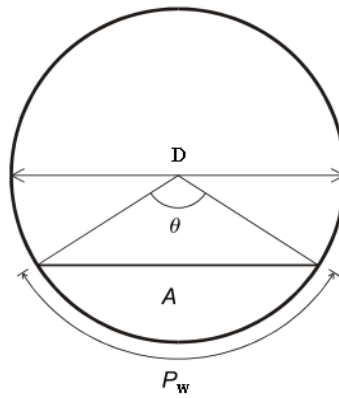
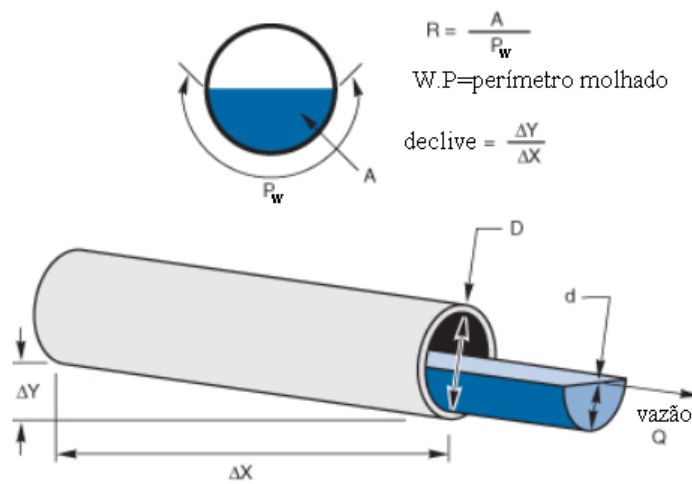


Figura 2.9: Seção transversal dos tubos parcialmente preenchidos



$$R = \frac{A}{P_w}$$

W.P=perímetro molhado

$$\text{declive} = \frac{\Delta Y}{\Delta X}$$

Figura 2.10: Método de Manning

$$v = \frac{R^{2/3} \cdot S^{1/2}}{n} \tag{2.20}$$

O radio hidráulico está definido pela equação 2.21.

$$R = \frac{A}{P_w} \tag{2.21}$$

Onde “ P_w ” é o perímetro úmido, e “ A ” é a seção transversal do duto. Das Figuras 2.9 e 2.10 obtém-se as equações 2.22 a 2.25:

$$P_w = \frac{\theta \cdot D}{2} \quad (2.22)$$

$$A = \frac{D^2}{8} (\theta - \sin \theta) \quad (2.23)$$

$$R = \frac{D(\theta - \sin \theta)}{4 \cdot \theta} \quad (2.24)$$

$$v = \left(\frac{D}{4}\right)^{2/3} \left[1 - \frac{\sin \theta}{\theta}\right]^{2/3} \cdot \frac{S^{1/2}}{n} \quad (2.25)$$

Com esses dados a vazão é calculada com as equações 2.26 e 2.27:

$$Q = v \cdot A \quad (2.26)$$

$$Q = \frac{D^{8/3}}{2^{13/3}} \cdot \frac{(\theta - \sin \theta)^{5/3}}{\theta^{2/3}} \cdot \frac{S^{1/2}}{n} \quad (2.27)$$

- Q: Vazão
- A: Seção transversal do fluxo
- R: Radio hidráulico (area seção transversal entre o perímetro molhado)
- S: inclinação ou declive do canal no ponto de medição
- n: Rugosidade da superfície (depende do material do canal)

2.5.4 Método de Traçadores com Acúmulo de Detritos Sólidos.

No ano de 1959, J.C Lee, desenvolveu uma metodologia para medir a vazão em tubulações de água, como mostrado na Figura 2.11, que estão parcialmente preenchidos por resíduos sólidos [59].

O método consiste em injetar uma quantidade conhecida de traçador químico em um fluido que desloca pela tubulação e entre dois pontos de detecção separados por uma distância “L”, determina-se a concentração do traçador, c, em função do tempo nesses pontos. O método é aplicável em seções retas de duto e para valores de número de Reynolds maiores que 10^6 e tubulações com diâmetro grande.

A vazão de massa é calculada por meio da equação 2.28 que relaciona a massa do traçador injetado com a área sob a curva c, t:

$$M = \int_0^{\infty} Q \cdot c(t) \cdot dt = Q \cdot A_c \quad (2.28)$$

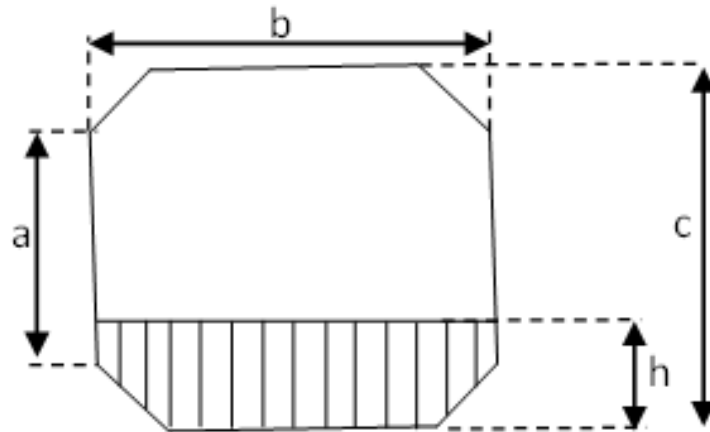


Figura 2.11: Tubulação subterrânea, onde h é a altura dos detritos e a,b,c são as dimensões da tubulação

- Q: vazão no ponto de medição
- c(t): concentração de traçador no ponto de medição
- A_c : área sob a curva no ponto de detecção

Ou seja, a vazão de massa em um determinado ponto é igual à quantidade de traçador injetado dividido pela área sob a curva naquele ponto.

Por outro lado, a velocidade média do deslocamento do traçador é calculada pela equação 2.29:

$$u = \frac{L}{\tau} = \frac{L}{(\bar{t}_2 - \bar{t}_1)} \quad (2.29)$$

- τ : tempo de deslocamento do traçador entre os dois pontos de detecção
- $\bar{t}_2; \bar{t}_1$: tempos médios nos pontos de medição

Os tempos médios em cada ponto são calculados por meio da equação do primeiro momento 2.30:

$$\bar{t} = \frac{\int_0^{\infty} c(t) \cdot t \cdot dt}{\int_0^{\infty} c(t) \cdot dt} \quad (2.30)$$

A fração de volume ocupada pelos detritos sólidos é determinada segundo este método pela equação 2.31:

$$f = 1 - \frac{Q \cdot L}{V_0 \cdot u} \quad (2.31)$$

Onde:

- Q: vazão entre os pontos de detecção
- L: separação entre os pontos de detecção
- V_0 : volume da tubulação entre os pontos de detecção
- u: velocidade médio de deslocamento do traçador entre os pontos de detecção

2.6 Filtro Savitzky-Golay (SG)

Savitzky e Golay propuseram um método de suavização de dados baseado na aproximação polinomial de mínimos quadrados locais. Eles mostraram que, ajustando um polinômio a um conjunto de pontos de entrada e, em seguida, avaliando o polinômio resultante em um único ponto dentro do intervalo de aproximação é equivalente a uma convolução discreta com uma resposta de impulso fixo.

Os filtros de passa baixo obtidos por este método são amplamente conhecidos como filtros (SG). Savitzky e Golay no início estavam interessados em suavizar ruídos dos analisadores de espectros químicos e demonstraram que a suavização usando o método de mínimos quadrados reduz o ruído, mantendo a forma e a altura dos picos e a forma de onda. No livro “Digital Filter” [60] há uma discussão detalhada do uso do método dos mínimos quadrados para filtragem de dados. E no livro “Introduction to Signal Processing” disponível de forma gratuita no site (<http://www.ece.rutgers.edu/orfanidi/intro2sp/>) [61] tem uma discussão detalhada dos filtros de Savitzky-Golay.

A propriedade de preservação de forma de pico dos filtros (SG) é aplicada no processamento de eletrocardiogramas e o conceito básico de alisamento polinomial de mínimos quadrados foi generalizado para duas dimensões e no processamento de imagens de ultrassom [62].

A idéia básica por trás da suavização polinomial de mínimos quadrados é descrita na figura 2.12, que mostra uma seqüência de dados de um sinal $x(n)$ como pontos sólidos. A partir de um conjunto de $(2M + 1)$ pontos centrados em $n = 0$, obtém-se os coeficientes de um polinômio:

$$p(n) = \sum_{k=0}^N a_k \cdot n^k \quad (2.32)$$

Que minimizam o erro de aproximação da média dos quadrados do grupo de dados de entrada centrados em $n = 0$,

$$\varepsilon_N = \sum_{-M}^M (p(n) - x[n])^2 = \sum_{-M}^M \left(\sum_{k=0}^N a_k \cdot n^k - x[n] \right)^2 \quad (2.33)$$

OA análise é a mesma para outro grupo de $(2M + 1)$ pontos. Na Figura 2.12, onde $N = 2$ e $M = 2$, a curva sólida à esquerda é o polinômio $p(n)$ avaliado em uma grade fina entre -2 e $+2$, e o valor de saída suavizada é obtido pela avaliação de $p(n)$ no ponto central $n = 0$. Ou seja, a saída $y[0]$, para $n = 0$ é:

$$y[0] = p(0) = a_0 \quad (2.34)$$

Isto é, o valor de saída é apenas igual ao coeficiente polinomial de grau 0.

A saída no próximo conjunto de pontos é obtida deslocando o intervalo de análise à direita em um ponto, redefinindo a origem para ser a posição da metade do conjunto de $(2M + 1)$ pontos do novo bloco, repetindo o ajuste polinomial e avaliando na posição central. Isso pode ser repetido em cada conjunto de entrada, cada vez produzindo um novo polinômio e um novo valor da sequência de saída $y[n]$. O artigo original de Savitzky e Golay [63] mostra que em cada posição, o valor de saída suavizado obtido por amostragem do polinômio ajustado é idêntico para uma combinação linear fixa do conjunto local de pontos de entrada; ou seja, o conjunto de $(2M + 1)$ pontos de entrada dentro do intervalo de aproximação são efetivamente combinados por um conjunto fixo de coeficientes de ponderação que podem ser calculados para uma ordem polinomial determinada N , e um intervalo de aproximação de comprimento $(2M + 1)$. Ou seja, os pontos de saída podem ser calculados por uma convolução discreta da forma:

$$y[n] = \sum_{-M}^M h[m] \cdot x[n - m] \quad (2.35)$$

Os pontos marcados com “x” na Figura 2.12 são as respostas dos deslocamentos $h[0 - m]$ e $h[10 - m]$ que são usados para calcular a saída dos pontos marcados com “o”. O processo de ajuste polinomial pode ser repetido para cada conjunto de pontos com a simples avaliação da equação 2.35.

Os coeficientes ótimos do polinômio 2.32 são obtidos derivando a equação 2.33 com relação a cada um dos $N + 1$ coeficientes desconhecidos e igualando a derivada a zero.

$$\frac{\partial \varepsilon_N}{\partial a_i} = \sum_{-M}^M 2n^i \left(\sum_{k=0}^N a_k \cdot n^k - x[n] \right) = 0 \quad (2.36)$$

É importante ter em mente, antes de continuar que a solução única requer que se tenha pelo menos tantas amostras de dados quanto os coeficientes na aproximação polinomial.

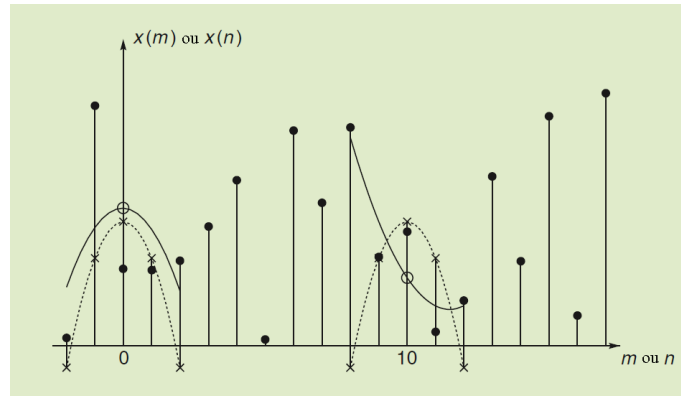


Figura 2.12: Alisamento por mínimos quadrados de um ajuste local de um polinômio de segundo grau (linha contínua) para um conjunto de cinco dados de entrada: os pontos sólidos “●” são os pontos de entrada, “○” são os pontos de saída dos mínimos quadrados, “x” são os pontos do impulso fixo (constantes ponderadas), (A linha pontilhada denota a aproximação polinomial ao impulso unitário central.)

2.7 Métodos de Interpolação

Interpolar uma função $f(x)$ consiste em aproximar essa função por uma outra $g(x)$ em geral mais simples e que coincida com a função $f(x)$ em um conjunto de pontos [64]. A função $g(x)$ é então usada em substituição à função $f(x)$, em outras palavras, a interpolação é um método que permite construir um novo conjunto de dados a partir de um conjunto discreto de dados conhecidos. Geralmente têm-se dados pontuais, obtidos a partir de uma amostragem ou experimento.

Outra aplicação da interpolação é aproximação de funções complexas por funções mais simples. Obviamente, quando utilizamos a função mais simples para calcular novos dados, normalmente não se obtém o mesmo resultado da função original, mas dependendo do domínio do problema e do método de interpolação utilizado, o ganho de simplicidade pode compensar o erro.

2.8 Tipos de Interpolação

Existem vários tipos de interpolação: Interpolação Linear, Interpolação polinomial, Interpolação com funções trigonométricas e por expansão em série. Será mencionado, com ênfase, a Interpolação Polinomial de Lagrange que foi usado neste estudo.

- **Linear** Consiste em aproximar uma função num intervalo por uma função linear, ou seja, utilizando polinômios de primeiro grau.
- **Polinomial** Utilizam-se polinômios como funções interpoladores (interpolação po-

Lagrange encarregou-se de calcular o único polinômio interpolador de forma analítica, ou seja, o polinômio $P_n(x)$ de grau $\leq n$ que passa pelos $n + 1$ pontos:

$$P_n(x) = y_0L_{n,0}(x) + y_1L_{n,1}(x) + \dots + y_nL_{n,n}(x) \quad (2.40)$$

O polinômio de interpolação é a combinação linear dos polinômios da base de Lagrange dados por:

$$L_{n,k}(x) = \prod_{i=0, i \neq k}^n \frac{x - x_i}{x_i - x_k} \quad (2.41)$$

No caso de medição de vazão pelo método de “Cross Correlation”, a interpolação é aplicada quando a taxa de amostragem é usualmente baixa para aumentar a quantidade de dados antes de calcular a função de “Cross Correlation”. Em trabalhos prévios, foram usados outros tipos de interpolação [35], [38].

2.9 Procedimentos para Detectar Observações Atípicas em Amostras Experimentais

A detecção de dados atípicos (por exemplos, dados de uma população diferente, erro de amostragem, etc.) é uma questão importante quando são analisados os dados de testes experimentais. Um valor atípico é uma observação que parece desviar-se marcadamente de outras observações na amostra.

- Um resultado atípico pode indicar dados incorretos. Por exemplo, os dados podem ter sido codificados incorretamente ou um experimento pode não ter sido executado de forma correta. Se for possível determinar que um ponto periférico está, de fato, incorreto, o valor da informação deve ser removido da análise (ou corrigido, se possível)[65].
- Em alguns casos, pode não ser possível determinar se um dado atípico é uma informação incorreta. Os pontos atípicos podem ser devidos a variações aleatórias ou podem indicar algo cientificamente interessante. Em qualquer caso, é indicado não simplesmente apagar a observação periférica. No entanto, se dados atípicos fossem significativos, talvez seja necessário considerar o uso de outras técnicas estatísticas.[65]

Vários métodos estatísticos para a detecção de resultados atípicos têm sido propostos. O teste estatístico sempre pode ser usado para apoiar o julgamento de que há uma razão física para um dado atípico, ou o critério estatístico pode ser usado rotineiramente como base para iniciar uma ação visando encontrar uma causa física.

Neste trabalho serão mencionados apenas dois dos mais usados na hora de testar estatisticamente um conjunto de amostras de dados experimentais, o método de Grubbs [66] e o método de Dixon.

2.9.1 Teste de Grubbs

Esta baseado na suposição de que os dados experimentais seguem a distribuição normal e detecta só um resultado por vez. Se um dado é rejeitado, o método continua-se aplicando até não conseguir mais dados atípicos.

O teste está baseia-se nas seguintes hipóteses:

- H_0 : O conjunto de dados não tem nenhum dado atípico (hipótese nula)
- H_a : O conjunto só tem um dado atípico (hipótese alternativa)

O teste está definido para apenas um resultado pela equação 2.42:

$$G_n = \frac{|x_n - \bar{x}|}{s} \quad (2.42)$$

Onde:

- \bar{x} : média de uma amostra de n dados.
- s: desvio padrão

O parâmetro G é o maior desvio absoluto da média amostral em unidades do desvio padrão da amostra. Os dados são classificados em ordem crescente antes de aplicar o teste.

2.9.2 Teste de Dixon

Está baseado também na suposição de que os dados experimentais seguem a distribuição normal. O teste de Dixon é o mais simples deste tipo. Esse teste permite examinar se uma, e apenas uma, observação de um pequeno conjunto de observações (tipicamente de 3 a 10) pode ser "legitimamente" rejeitada ou não. A aplicação do teste é muito simples:

1. Os n valores do conjunto de observações são colocados em ordem crescente: $x_1 < x_2 < \dots < x_n$

2. É calculado um valor Q experimental chamado de Q_{exp} . Esta é uma razão definida como a diferença do valor suspeito do seu mais próximo dividido pelo intervalo dos valores (Q: quociente de rejeição). Assim, para testar x_1 ou x_n (como possíveis valores atípicos) usa-se os seguintes valores Q_{exp} :

$$Q_{exp} = \frac{x_2 - x_1}{x_n - x_1} = \frac{x_n - x_{n-1}}{x_n - x_1} \quad (2.43)$$

3. O valor Q experimental, Q_{exp} , obtido é comparado com o valor Q crítico Q_{crit} , encontrado nas tabelas de Dixon. Este valor crítico deve corresponder ao nível de confiança (CL) que decidiu-se executar o teste (geralmente: CL = 95%).
4. Se $Q_{exp} > Q_{crit}$, então o valor suspeito pode ser caracterizado como um valor atípico e pode ser rejeitado, caso contrário, o valor suspeito deve ser mantido e usado em todos os cálculos subsequentes.

2.10 Código MCNPX

O Monte Carlo é um método de cálculo amplamente usado na área das aplicações de radioisótopos. Monte Carlo pode ser usado para duplicar teoricamente um processo estatístico (tais como: a interação de partículas nucleares com materiais) e é particularmente útil para problemas complexos que não podem ser modelados por códigos de computador que usam métodos determinísticos. Os eventos probabilísticos individuais que compreendem um processo são simulados sequencialmente. No transporte de partículas, o método de Monte Carlo é muito real (é um experimento numérico) [67]. Ele faz o seguimento de cada uma das partículas desde a fonte ao longo da sua vida à sua morte que pode acontecer por meio de algum processo, tais como: absorção, escape, etc. A vida de uma partícula desde a fonte até sua morte é chamado de história. Nesta pesquisa as simulações foram realizadas especificamente com o código MCNP-X (Monte Carlo N-Particle eXtended). O MCNPX é um código de propósito geral de transporte de radiação desenvolvido para o estudo das interações de nêutrons, fótons e elétrons em diferentes sistemas físicos em um amplo intervalo de energias.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho desenvolve-se um método de calibração para medidores de vazão de água usando radiotraçadores e técnica de “Cross Correlation”. O método consiste em incluir no “correlator” um filtro de Savitzky-Golay que é aplicado ao sinal de cada detector inicialmente para suavizá-lo antes do cálculo da função de “Cross Correlation”. Uma vez calculada a função de “Cross Correlation” essa é interpolada mediante o método de interpolação de Lagrange. Com a interpolação se consegue melhorar a resolução da função diminuindo o intervalo de tempo entre pontos adjacentes. Finalmente a função é ajustada mediante um polinômio de grau 3 e por cálculo diferencial é determinado o máximo que dá automaticamente o tempo de retardo do deslocamento do traçador. Através desta metodologia é possível determinar o tempo de retardo com uma incerteza de 1%, com a determinação deste tempo finalmente é calculada a vazão.

3.1 Sistemas de Detecção

3.1.1 Sistema de Detecção 1

Nos experimentos são usados dos tipos de sistema de detecção, o primeiro baseado num modulo “Nuclear Instrument Module (NIM Bins)” conectados a detectores de NaI(Tl) de 1”x1” usando cabos coaxiais segundo o diagrama em bloco apresentado na Figura 3.1.

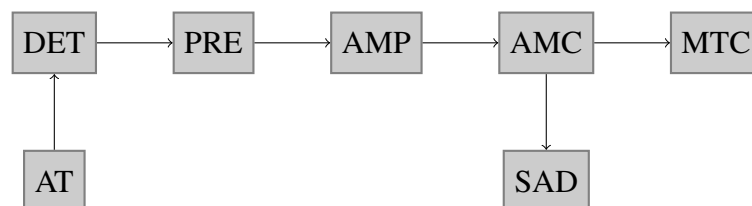


Figura 3.1: Diagrama em bloco dos módulos eletrônicos para o registro do sinal de cada detector

onde:

- DET: Detector cintilador de NaI(Tl) 1”x1” marca HARSHAW modelo Integral Line
- AT: Fonte de alta tensão Marca Micronal modelo 1023

- PRÉ: Pre-amplificador Marca ORTEC modelo 113
- AMP: Amplificador com Filtro Ativo marca ORTEC modelo 435
- AMC: Analisador Mono Canal marca Micronal modelo 4010
- MTC: Medidor de Taxa de Contagem marca ORTEC modelo 449

Um sistema de aquisição de dados que consiste em um cartão com conversor analógico digital (ADC) é acoplado ao barramento de um microcomputador permitindo registrar as medições em intervalos de tempo específicos dos sinais que vêm dos detectores cintiladores. Dependendo da vazão investigada, o intervalo de tempo de aquisição, “ Δt ”, é ajustado. Os dados registrados estão no formato ASCII e são compatíveis com editores de texto convencionais. Este sistema de aquisição permite processar dados a uma taxa de amostragem em um intervalo de 10 Hz a 100 kHz permitindo avaliar o deslocamento dinâmico do traçador em vazões altas. Um osciloscópio digital Marca RIGOL modelo DS1202CA (OSC) é utilizado para avaliar os sinais entre os módulos do sistema de detecção.

3.1.2 Sistema de Detecção 2

O segundo sistema é mais moderno e é baseado em analisadores monocanais (single channel analyzer - SCA) marca Ludlum, Model 4612 que permite controlar e ajustar todos os parâmetros dos detectores de forma automática por meio de um computador. Este sistema permite conectar até 12 detectores a uma taxa de amostragem máxima de 20 Hz o que corresponde a $\Delta t = 50$ ms [68]. Na Figura 3.2 é apresentada uma imagem desse sistema.



Figura 3.2: Vista em perspectiva do sistema de detecção Ludlum.

3.2 Calibração dos Detectores

Antes de realizar qualquer teste experimental foi necessário obter a curva de tensão de operação de cada detector. O procedimento para ajustar este parâmetro é realizado de forma conjunta com o sistema de medição. Posiciona-se uma fonte de ^{137}Cs na frente de cada detector. Eleva-se a alta voltagem a partir de 350 V, valor indicado pelo fabricante do detector, em passos de 10 V. A cada incremento foi realizado um contagem durante dois minutos. Usando o sistema de Detecção-1, registrou-se as contagens em função da voltagem aplicada, quando o sinal está se saturando, para se de elevar a alta tensão e os resultados são representados graficamente. A partir daí observa-se um patamar, na metade desta região encontrasse o ponto de operação [69].

Ajuste no nível de discriminação: Para que seja registrada somente a passagem do radiotraçador pela unidade ajusta-se a janela de energia do multicanal e o nível de discriminação utilizando o monocanal para fixar os níveis inferior e superior garantindo que o pulso medido, deve-se somente ao radiotraçador.

3.3 Linha de Transporte

Todos os testes experimentais foram realizados em uma linha de transporte de água de 30 m de comprimento, construída com tubos de policloreto de vinila (PVC) de 3/4" e os sinais são registradas com detectores cilíndricos de NaI(Tl) 1"x1" posicionados axialmente à tubulação. Cada detector é blindado na lateral com tijolos de Pb de 5 cm de espessura. A água é impulsionada por uma bomba mecânica que permite estabelecer vazões de 200 L.h^{-1} a 1000 L.h^{-1} . A linha de transporte tem instalado um rotâmetro marca Krohne que permite medir os valores experimentais das vazões. Este instrumento tem uma precisão de 2% no fundo de escala.

Para registrar os sinais são usados o sistema de Detecção-1 ou Detecção-2 descritos no item anterior. Na figura 3.3 é mostrado um diagrama esquemático da configuração experimental da linha de transporte usada nas medições. Na figura estão posicionados seis detectores que foi o número máximo usado em alguns testes.

Importante destacar, que o escoamento ocorre em regime turbulento, homogêneo e estacionário garantindo a completa mistura do radiotraçador com a água.

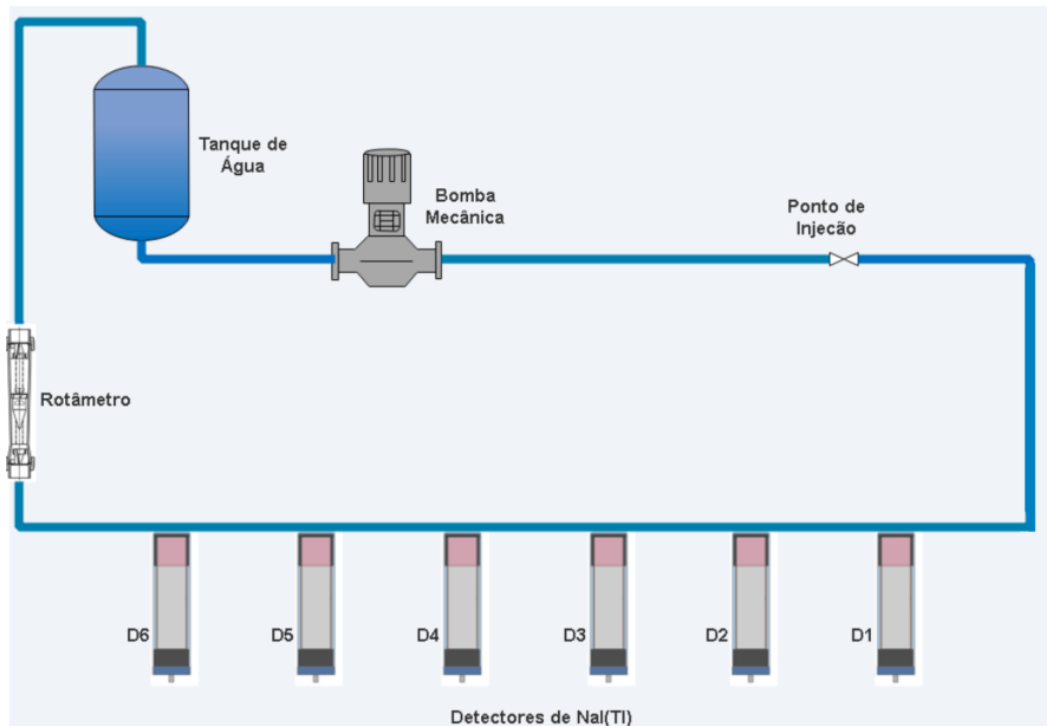


Figura 3.3: Linha de Transporte de Água

3.4 Seção de Teste utilizada para o Cálculo da Fração de Volume

Uma seção de teste foi construída com um duto em acrílico para realizar as medições de frações de volume, com diâmetro interno de 7 cm e uma espessura de parede de 0,5 cm e um comprimento de 50 cm totalizando um de volume interno de 1924 mL, e é mostrada na figura 3.4.

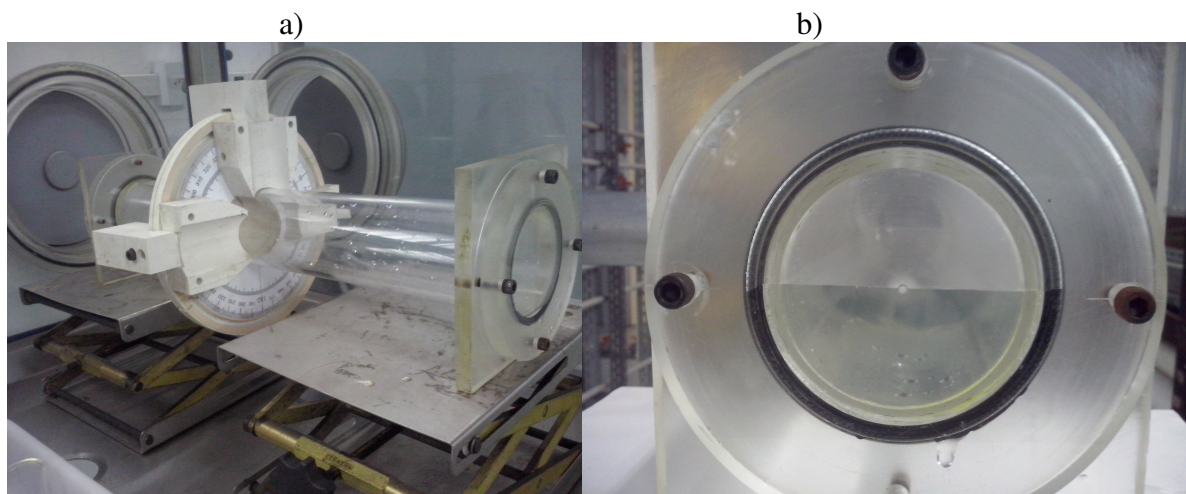


Figura 3.4: Imagens da seção de teste: a) Cilindro acrílico em perspectiva; b) Seção preenchida parcialmente com água, vista frontal.

A seção de teste foi preenchida experimentalmente com o auxílio de uma bureta de vidro com escala graduada de incerteza 0,1 mL e é apresentada na figura 3.5.



Figura 3.5: Bureta de vidro com escala graduada

3.5 Preparação do Traçador

Quando o fluido a ser marcado é água, um dos radiotraçadores que se destaca é (NaBr)[70]. O radioisótopo ^{82}Br é obtido por ativação neutrônica no Reator Argonauta do IEN, sob as seguintes condições:

- material a irradiar: Brometo de sódio (NaBr)
- canal de irradiação do reator: J9
- fluxo de nêutrons térmicos: $1,6 \times 10^9$ nêutrons. $\text{cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$
- fluxo de nêutrons epitérmicos: $2,54 \times 10^7$ nêutrons. $\text{cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$
- tempo de irradiação: 1 h (dependendo da atividade requerida)
- massa total irradiada: 5,0 g
- energia do radioisótopo ^{82}Br : 554 keV

O traçador é um sal e facilmente dissolvido em água.

Nas figuras 3.6 e 3.7 são apresentados o esquema de decaimento e o espectro de energia do ^{82}Br respectivamente.

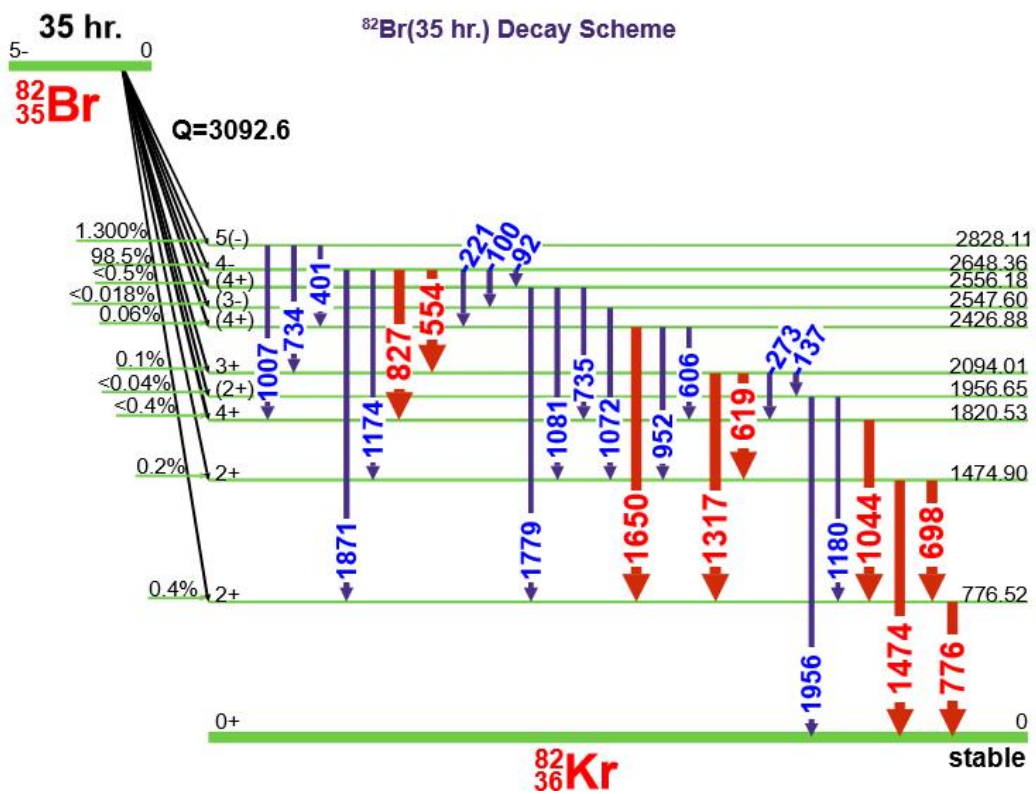


Figura 3.6: Esquema de decaimento do ^{82}Br

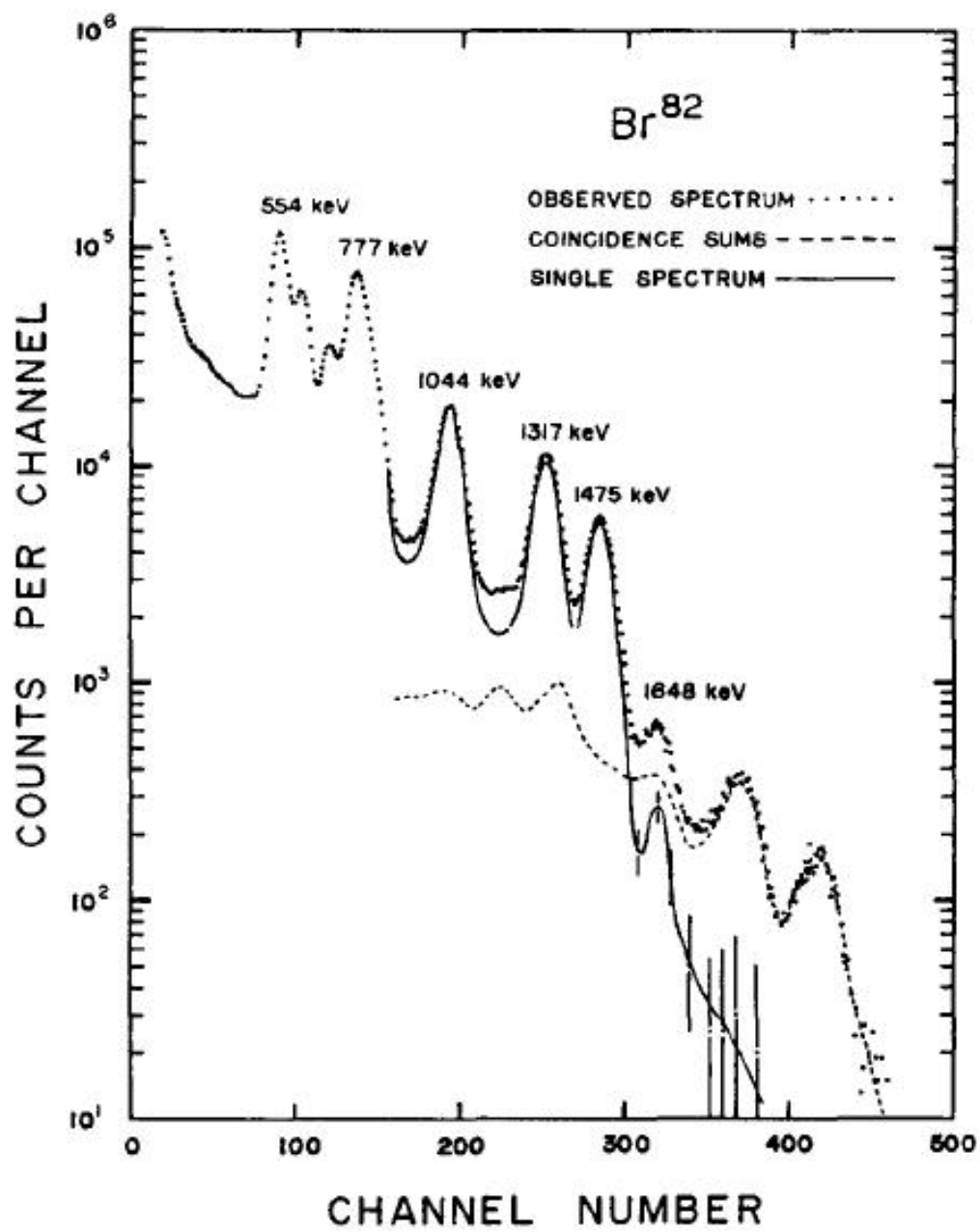


Figura 3.7: Espectro de energia do ^{82}Br

3.6 Correlatores

Os sistemas utilizados para calcular a função de “Cross Correlation” na literatura são conhecidos como correlatores (“Correlators”). Como mencionado no Capítulo 2 , não é necessário efetuar a subtração da linha de base quando se usa a técnica de “Cross-Correlation” para não dificultar o processo de integração numérica necessário para o cálculo do transiente do tempo τ e da dispersão associada, diferentemente do método tradicional do cálculo do transiente do tempo usando a técnica das funções distribuição do tempo de residência (RTD) que necessita de tal correção. O coeficiente de “Cross-Correlation” tem um comportamento da distribuição Gaussiana permitindo então que a qualidade dos resultados seja avaliada calculando-se os momentos estatísticos tradicionais, ou seja: o valor médio medido pelo primeiro momento estatístico em torno da origem a dispersão dada pelo segundo momento estatístico em torno da média, o coeficiente de assimetria dado pelo terceiro momento estatístico em torno da média. Em seguida são descritos os dois correlatores usados neste trabalho.

3.6.1 Correlator-1: Sem tratamento matemático especial (STM)

Os dados são inseridos à entrada do correlator diretamente como são registrados no SAD, sem nenhum tratamento especial prévio. As etapas para cálculo da vazão realizadas por esse correlator são apresentadas a seguir:

1. Entrada dos dados gerados pelo SAD.
2. Seleção da Janela, que é o número de dados usados no cálculo do coeficiente de “Cross Correlation”.
3. Cálculo da função de cross correlation no Modo de operação: *Direto*.
4. Ajuste polinomial.
5. Estimativa do tempo de retardo “ τ ”.
6. Calculo da vazão “ Q ”.
7. Os dados de saída estão em formato ASCII para que possam ser lidos por qualquer editor de texto.

Na figura 3.8 é apresentado um diagrama esquemático do Correlator-1.

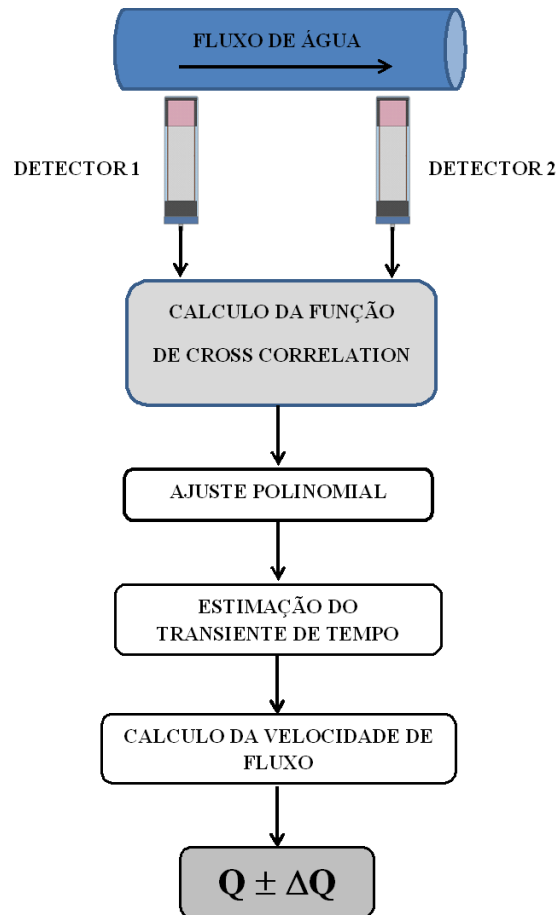


Figura 3.8: Diagrama do Correlator-1

3.6.2 Correlator-2: Com tratamento matemático especial (CTM)

O Correlator-2 baseou-se no Correlator-1 mas foi modificado inserindo-se um pré-tratamento (filtragem e interpolação) nos dados antes de ser realizar o cálculo da função de “Cross Correlation”.

1. Entrada dos dados gerados pelo SAD.
2. Filtro Savitzky-Golay
3. Interpolação de Lagrange
4. Seleção da Janela para o cálculo dos coeficiente de “Cross Correlation”.
5. Calculo da função de cross correlation no Modo de operação: *Direto*.
6. Ajuste polinomial da Função de ‘Cross Correlation’.
7. Estimativa do tempo de retardo “ τ ”.
8. Calculo da vazão “ Q ”.

9. Os dados de saída estão em formato ASCII para que possam ser lidos por qualquer editor de texto.

O diagrama esquemático do Correlator-2 é apresentado na Figura 3.9.

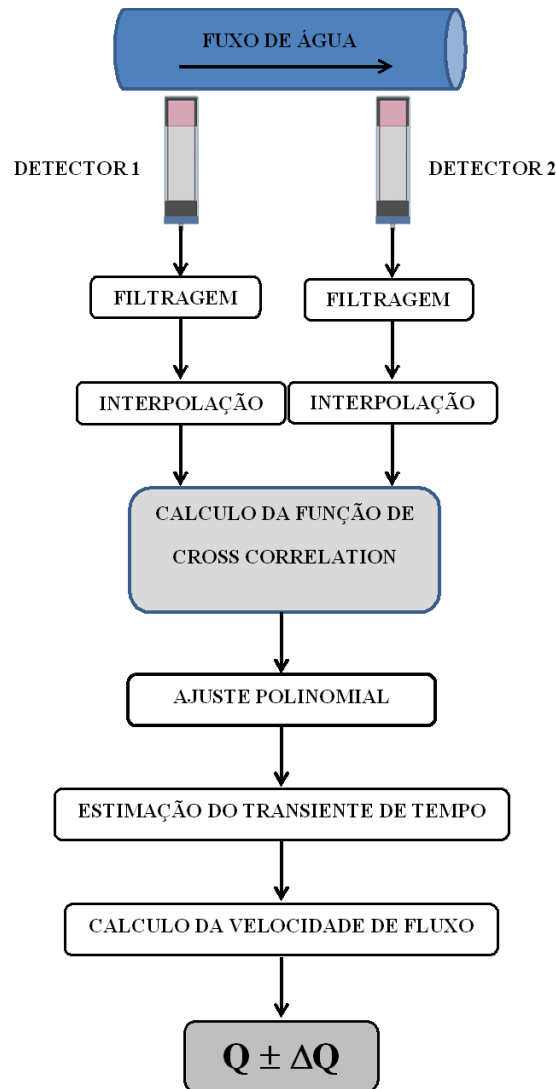


Figura 3.9: Diagrama do Correlator 2

3.6.3 Filtragem Savitzky-Golay (SG) e Interpolação de Lagrange

O filtro é aplicado para facilitar o cálculo da cross suavizando os dados de entrada

Finalidade da Aplicação do filtro SG

- Melhorar a relação sinal ruído, permitindo o cálculo da função de “Cross Correlation”, ainda nos casos de sinais com baixa intensidade e muito ruído eletrônico.
- Facilitar a interpolação dos dados antes de aplicar a função de “Cross Correlation”

- Melhorar o ajuste polinomial da função de “Cross Correlation” melhorando a estimativa do transiente de tempo.

Finalidade da Aplicação da Interpolação de Lagrange

É aplicada para melhorar a frequência de amostragem do dado experimental antes do cálculo da função de cross correlation ajudando a melhorar a estimativa do transiente de tempo. Por meio da interpolação é possível dividir os intervalos de tempo experimentais em outros muito menores.

Escolhe-se um número inteiro N entre 2 e 10 de tal forma conforme a equação 3.1:

$$N \cdot \Delta t_{Interpolado} = \Delta t_{Experimental} \quad (3.1)$$

Então, usando a equação 3.2:

$$\Delta t_{Interpolado} = \frac{\Delta t_{Experimental}}{N} \quad (3.2)$$

Dessa forma é possível dividir os intervalos experimentais entre duas e dez vezes, dependendo da necessidade dos requisitos do experimento.

Esse processo é feito antes de calcular a função de “Cross Correlation” apenas para obter uma função com pontos em intervalos menores, ou seja, a resolução está aumentando. Neste trabalho usando a interpolação consegue-se aumentar, matematicamente, a frequência de amostragem de 20 Hz a 200 Hz permitindo aumentar a estimativa do transiente de tempo. Na figura 3.10 é apresentado um exemplo do seu uso. As linhas verticais tracejadas (em azul) indicam dados interpolados na função original.

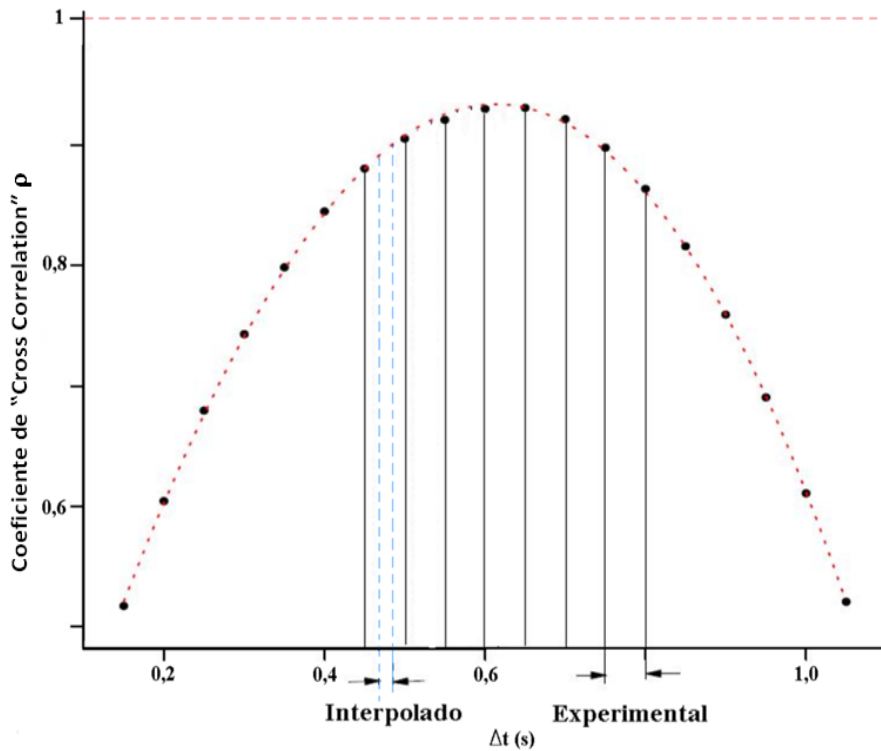


Figura 3.10: Gráfico Interpolado

3.7 Colimação

Neste trabalho usamos três tipos de colimação:

1. **Colimação com Fenda:** Os detectores são blindados lateralmente e frontalmente com Pb de 5 cm de espessura, e colimados com uma fenda central de 1 cm de largura, como mostrado na figura 3.11. Nesse caso, onde os detectores estão à menor distância, o volume efetivo está relacionado com o centro dos dois cristais de NaI(Tl) compondo assim, o volume efetivo que é mostrado na região hachurada da Figura 3.11.

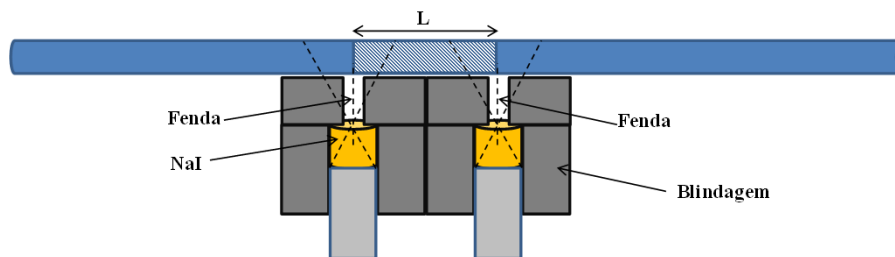


Figura 3.11: Colimação com Fenda

2. **Detectores com colimação aberta:** esta é a segunda geometria usada na qual os detectores são lateralmente blindados com tijolos de Pb de 5 cm de espessura e a parte frontal completamente exposta como mostrado na figura 3.12. Neste caso, quando os detectores estão próximos, é possível visualizar que o ângulo sólido de cada um dos detectores se sobrepõem formando uma região em vermelho mostrada na Figura 3.12.

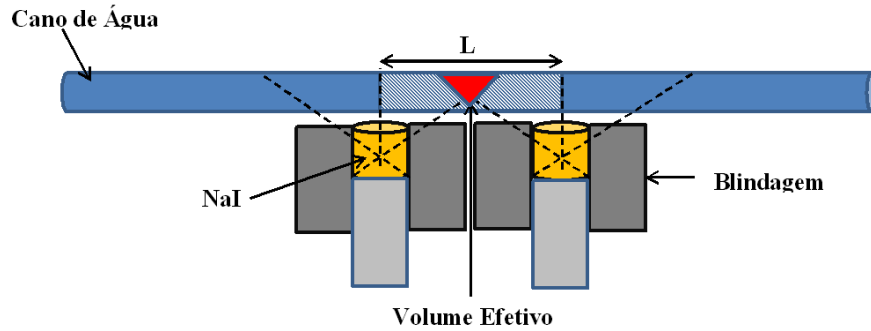


Figura 3.12: Colimação aberta sem otimizar

3. **Detectores com colimação aberta otimizada:** Nesta configuração os detectores são blindados somente na lateral com Pb de 5 cm de espessura mas estão deslocados verticalmente em 5 cm, para impedir a sobreposição ângulo dos sólidos, como mostrado na figura 3.13.

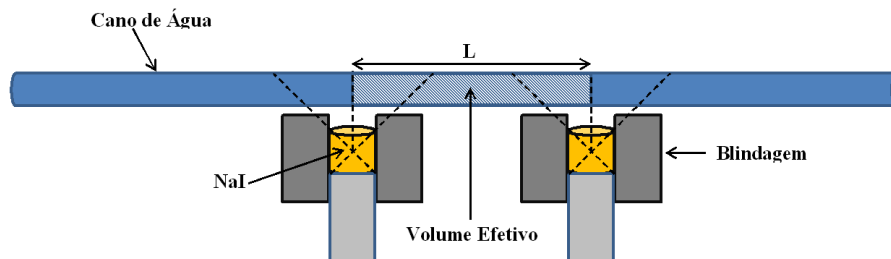


Figura 3.13: Colimação aberta otimizada

3.8 Efeito da colimação na medição da vazão

A seguinte experiência foi projetada com o objetivo de determinar o efeito do ângulo sólido na vazão e sua incerteza. Para tanto, utilizou-se um conjunto de dois pares de detectores independentes, o primeiro par de detectores estão separados a uma distância de 0,188 m, identificados como D1-D2. O segundo par de detectores separados a 0,205 m são identificados como D3-D4.

Com o primeiro par de detectores, D1-D2, é usada a Colimação Aberta. Com o segundo par de detectores, D3-D4 é usada a Colimação de Fenda.

Os dois sistemas de detectores foram testados para vazões de (200, 400, 600 e 800) L.h⁻¹. Para cada vazão foram realizados 3 testes independentes usando o sistema de Detecção-2 e o Correlator-1.

3.9 Teste da Vazão em Função da Distância

O objetivo do trabalho é desenvolver uma metodologia que permite o cálculo da vazão em dutos de água pela metodologia de radiotraçadores associada à técnica de “Cross-Correlation”. Um experimento foi elaborado com o objetivo de estudar o efeito da distância entre os detectores na medição da vazão e sua incerteza. A vazão foi calculada com os dois correlatores disponíveis, ou seja, com tratamento matemático especial e sem tratamento matemático especial. No primeiro teste utilizou-se o Correlator-1 para determinar a vazão. Numa fase posterior, avaliou-se o Correlator-2. Todos os estudos utilizaram o sistema de Detecção-2 e o sistema de Colimação Otimizado. A análise dos resultados utilizou o método de Grubbs, seção 2.26.1 para avaliar a estatística do conjunto de dados.

3.9.1 Teste da Vazão em Função da Distância usando o Correlator-1

Nesse estudo, seis detectores (D1, D2, D3, D4, D5 e D6) foram instalados com distâncias de separação entre eles de: (0,12; 0,33; 0,48; 0,60; 0,81; 0,97) m. Todas as distâncias são referenciadas ao D1. Foram realizados 3 testes para cada vazão de (200, 600, 800) L.h⁻¹ com os detectores posicionados conforme figura 3.3. Vale destacar que a frequência de amostragem do sistema de Detecção-2 é 20 Hz.

3.9.2 Teste da Vazão em Função da Distância usando o Correlator-2

Antes de inserir o filtro de Savitzky-Golay no Correlator-2, realizou-se um teste de avaliação de sua potencialidade. Com esse objetivo foram simulados dois sinais típicos de pulsos de injeções de radiotraçador considerando um duto de diâmetro de (3/4 ”) (1,905 cm), escoamento de água (turbulento) com a vazão igual a 200 L.h⁻¹ com o detector posicionado a 600,0 cm (Caso-1) e a 1200 cm (Caso-2) do ponto de injeção. Como traçador foi usado o Br-82 (coeficiente de dispersão na água igual a 2,5). Para cada caso foram gerados ruídos brancos com 1% e 10% que foram adicionados ao sinal original visando avaliar a potencialidade do filtro de Savitzky-Golay. Para efeito

comparativo calculou-se o erro percentual entre a dispersão e a média.

3.10 Interferência da Taxa de Amostragem dos Dados na Qualidade do Resultado da Vazão

Com objetivo de avaliar a taxa de amostragem dos dados, realizou-se uma simulação matemática verificar o efeito deste parâmetro no cálculo da vazão e posteriormente realizou uma validação experimental usando taxa de amostragem de 10 Hz e 1 kHz que disponíveis pelo sistema de Detecção-1.

3.10.1 Simulação Taxa de Amostragem

As simulações foram realizadas para a uma distância intermediária de separação entre os detectores, considerando a faixa de 0,12 a 0,97 m. Considerou-se um modelo de escoamento turbulento, $Re > 4000$, com regime estacionário para um sistema de tubos cilíndricos com diâmetro interno de 1,905 cm (3/4 "). Os parâmetros da simulação foram escolhidos para reproduzir as condições do sistema experimental com a finalidade de investigar as interferências da taxa de aquisição no cálculo da vazão:

- Vazões: $Q = 174 \text{ L.h}^{-1}$ e 720 L.h^{-1}
- Separação dos detectores: $d = 48 \text{ cm}$
- Coeficiente de Dispersão axial: $0,0250 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
- Taxas de amostragem: 2 Hz, 20 Hz e 200 Hz (1Hz = 1 aquisição/segundo = 1 s^{-1})

No caso da vazão de 720 L.h^{-1} só foram usadas duas taxas de 20 Hz e 200 Hz.

Todo sinal foi adicionado 20% de ruído branco que foi gerado na mesma taxa de amostragem que o dado correspondente. Para cada dado gerado foi calculado a função de "Cross Correlation" com ambos correlatores.

3.10.2 Validação Experimental da Taxa de Amostragem

Visando validar o modelo matemático simulado, realizou-se um experimento usando dois conjuntos detectores de NaI(Tl) de 1"x1" independentes, onde o primeiro conjunto está separado a distância de 0,153 m e o segundo a 0,480 m. A vazão é estabelecida para valores de (200, 400, 600 e 800) L.h^{-1} . Nesta etapa foi utilizado a Colimação Otimizada

e o sistema de Detecção-1. Todas as vazões são determinadas com o Correlator-2. Os testes foram realizados usando Taxa de Amostragem de 10 Hz e 1 kHz. Vale destacar que nesta etapa somente foi usado o Correlator-2

3.11 Medidor de Frações de Volume de Água

O objetivo deste estudo foi desenvolver uma metodologia para determinar o volume de água em tubos parcialmente preenchidos. Desta forma, propõe-se um medidor de fração de volume para um sistema bifásico água-ar que compreende um tubo cilíndrico em acrílico, uma fonte de ^{137}Cs e um detector cintilador de NaI(Tl) de 1x1" com colimador de chumbo e abertura circular de 5 mm. O tubo em acrílico tem as seguintes características 8,0 cm de diâmetro externo, 7,0 cm de diâmetro interno, 50 cm de comprimento e 0,5 cm de espessura de parede formando um volume total de 1924 cm^3 . O detector é posicionado diametralmente à fonte (180°) para registrar a radiação transmitida. Um esquema representativo desse sistema é apresentado na figura 3.14.

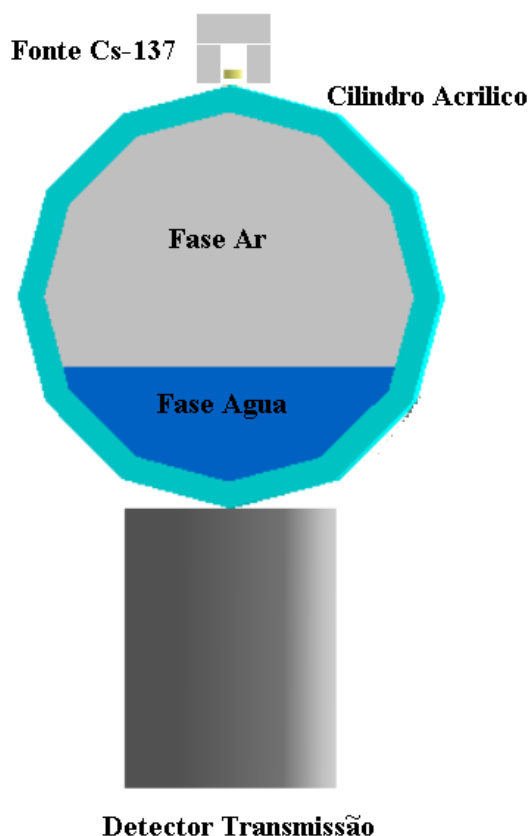


Figura 3.14: Vista Frontal do medidor de nível

Experimentalmente são determinadas as contagens de transmissão para o sistema completamente vazio, para volumes intermediários e completamente cheio (0, 500, 1000

e 1924) mL. A partir das medições é elaborada uma curva de calibração das contagens em função do volume de água no cilindro acrílico. A curva das contagens experimentais em função do volume é ajustada mediante uma regressão exponencial (equação de Beer Lambert) 3.3, onde μ é coeficiente de atenuação linear e x é o nível de água no interior do tubo em cilindro acrílico. Uma curva de calibração foi ajustada para calcular a fração de volume a partir das contagens registradas no detector.

$$I = I_0 \cdot e^{(-\mu \cdot x)} \quad (3.3)$$

Este mesmo sistema experimental foi simulado usando o código MCNPX para melhorar o ajuste da curva interpolando dados simulados. Quando se faz uma simulação da resposta de um detector de NaI(Tl) são necessárias realizar algumas correções para aproximar à resposta do sistema real [71]. Duas correções fundamentais têm que ser realizadas: a resolução de energia $\frac{\Delta E}{E}$, a qual descreve a capacidade de um detector de discriminar duas energias muito próximas no espectro e a eficiência de detecção que permite quantificar o campo de radiação.

A resolução de energia de um detector NaI(Tl) é normalmente reportada para o valor 662 keV de energia da fonte de ^{137}Cs . Na prática os dados têm uma distribuição Gaussiana e o código MCNPX não simula os efeitos físicos que produzem o alargamento do espectro, mas este tem uma técnica de ajuste que permite considerar a resolução do detector real medido experimentalmente e incluí-lo no cartão de entrada do código. Esta técnica consiste em usar o cartão "FT8 GEB" em conjunto com o "Tally F8" disponível também no código que é usado para obter a energia depositada no detector cintilador de NaI(Tl).

O cartão "FT8 GEB" precisa ser usado com três parâmetros (a, b, c) que são obtidos experimentalmente usando fontes de calibração, ver tabela 3.1. Registra-se a largura à meia altura (Full width at half maximum - FWHM) de cada fotopico em função da energia. Esta curva é ajustada por meio da função 3.4:

$$FWHM = a + b\sqrt{E + cE^2} \quad (3.4)$$

Onde: "E" é a energia (MeV) dos raios gama incidentes.

Tabela 3.1: Energias e probabilidades de emissão dos fotopicos usadas para calcular o GEB

Isótopo radioativo	Energia do Fotopico (keV)	Probabilidade (%)
^{241}Am	59,5	35,9
^{152}Eu	121,8	28,4
^{152}Eu	244,7	7,5
^{152}Eu	344,3	26,5
^{137}Cs	661,7	85,1
^{60}Co	1.332,5	100

É importante destacar que a eficiência de contagem não foi considerada neste estudo, para possíveis tentativas de reproduzir esta etapa do trabalho faz-se necessário considerar a eficiência do detector a ser usado.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Efeito da colimação do sistema de Contagem na Medição de vazão

Os resultados para o conjunto de sinais registrados nos detectores D1 e D2, usando o sistema de Colimação Aberta, para as vazões de (200, 400, 600 e 800) $L.h^{-1}$ são apresentados na Figura 4.1. As escalas de cada gráfico têm a mesma altura de 20 cps e a escala de tempo tem a mesma largura de 60 s. Pode-se observar que a medida que a vazão aumenta, os sinais registrados pelos detectores são mais estreitos e tendem a se aproximar ao ponto de maior amplitude.

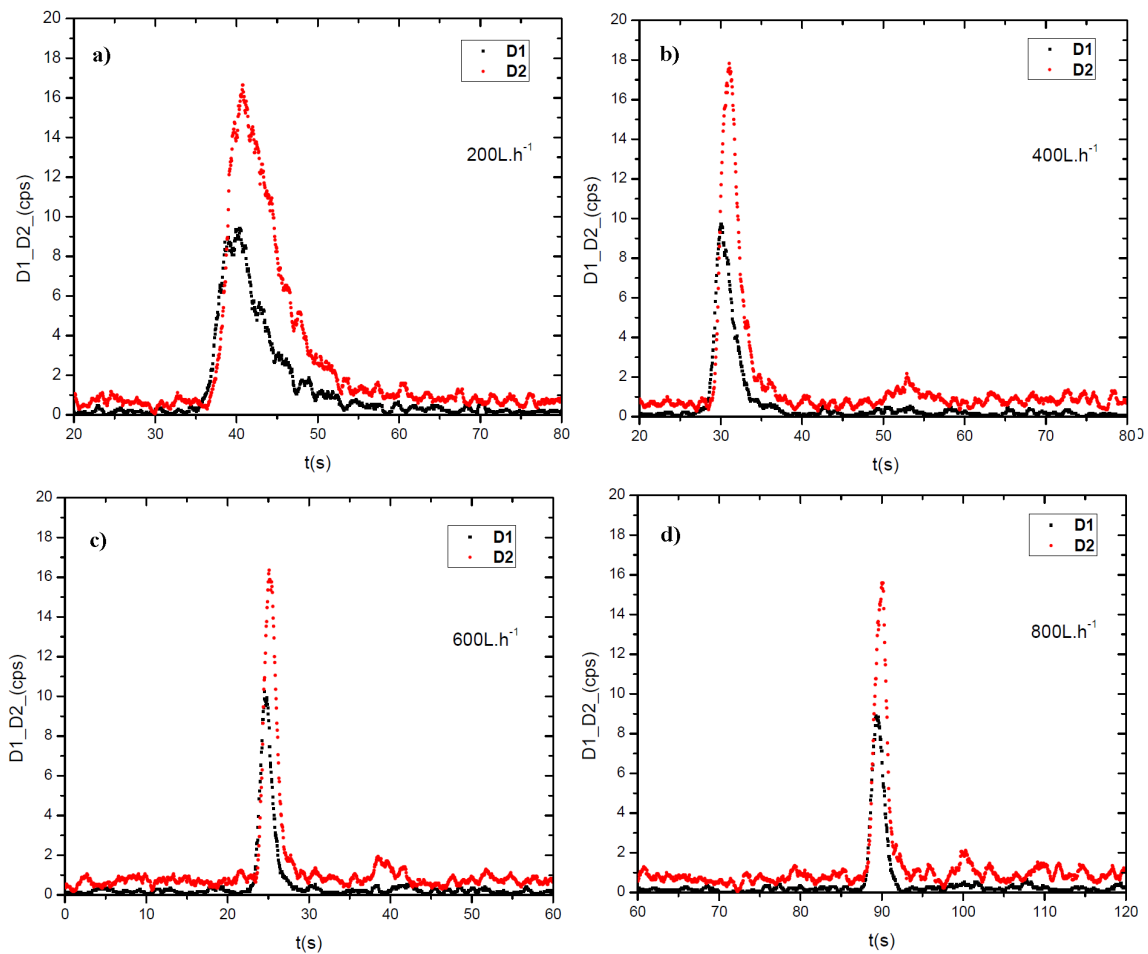


Figura 4.1: Sinais experimentais nos detectores 1 e 2 para a colimação aberta considerando uma vazão de: a) 200 $L.h^{-1}$; b) 400 $L.h^{-1}$ c) 600 $L.h^{-1}$. d) 800 $L.h^{-1}$.

Enquanto que, os sinais registrados para o conjunto de detectores D3 e D4 para as vazões de (200, 400, 600 e 800) $L.h^{-1}$ são apresentados na Figura 4.2. Vale destacar que a Colimação de Fenda foi usada nesta etapa. As escalas de cada gráfico têm a mesma altura de 100 cps e a escala de tempo de todos tem uma largura de 60 s. Da mesma forma que na Colimação Aberta, pode-se observar que à medida que a vazão aumenta os pulsos apresentam o mesmo comportamento.

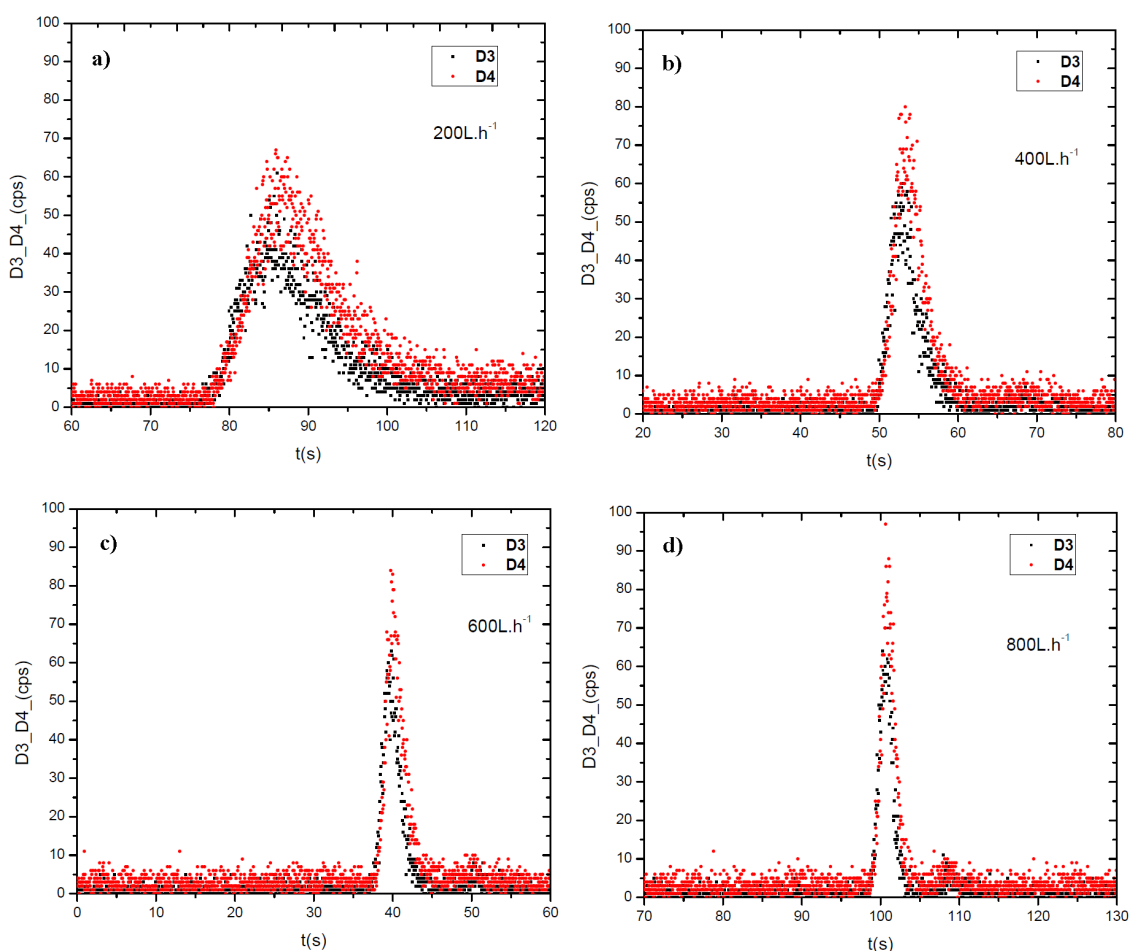


Figura 4.2: Sinais experimentais nos detectores 3 e 4 para a colimação aberta considerando uma vazão de: a) $200 L.h^{-1}$; b) $400 L.h^{-1}$ c) $600 L.h^{-1}$. d) $800 L.h^{-1}$.

Os cálculos do tempo de trânsito foram realizados usando o Correlator-1 tanto para a Colimação Aberta como a de Fenda e o cálculo da vazão com sua incerteza combinada pelas equações 2.8 e 2.10 respectivamente que são apresentados na figura 4.3. Nessa figura, as linhas horizontais contínuas correspondem à Vazão de Referência e as linhas tracejadas correspondem à incerteza da vazão de referência.

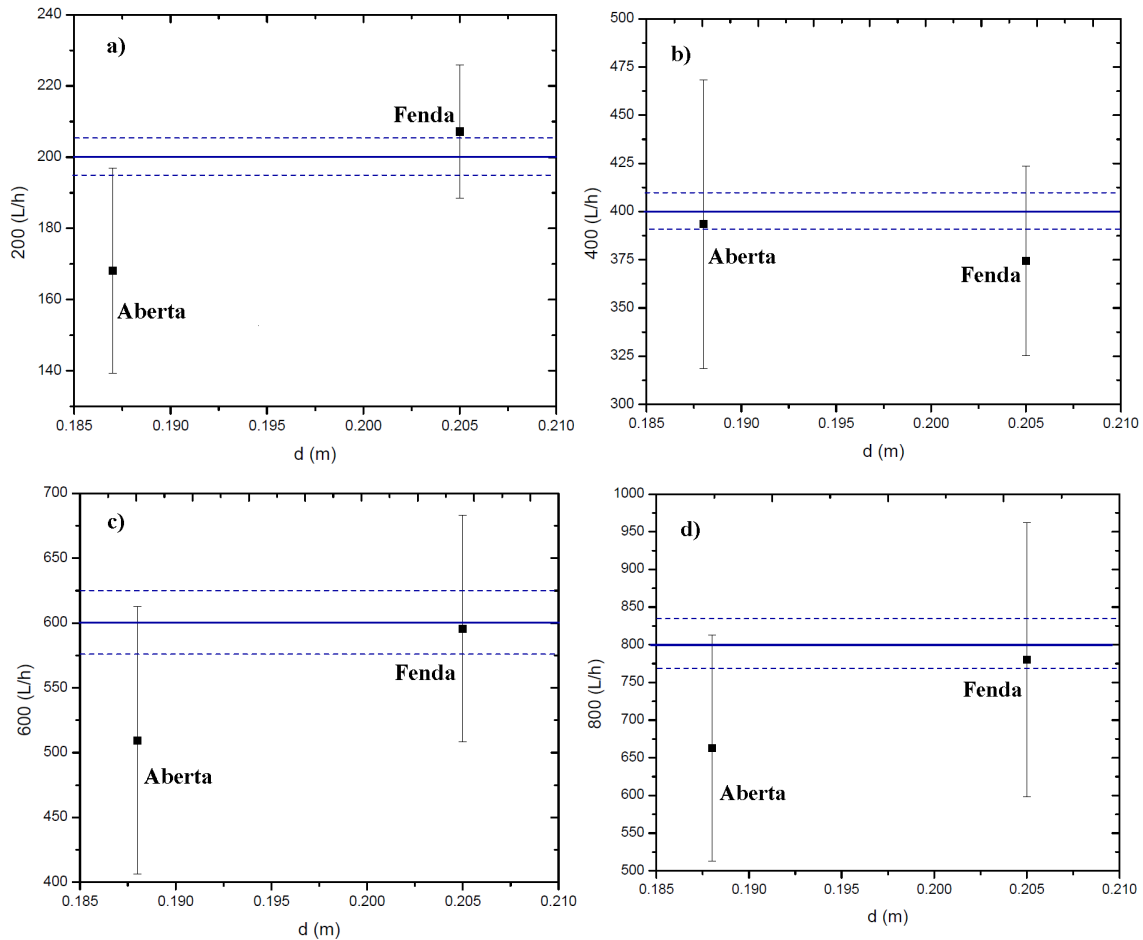


Figura 4.3: Valores de vazão com suas respectivas incertezas para a colimação Aberta e com Fenda: a) 200 L.h^{-1} ; b) 400 L.h^{-1} ; c) 600 L.h^{-1} ; d) 800 L.h^{-1}

Como pode ser visto pelos resultados deste experimento, quando os detectores estão a uma distância de 0,188 m usando a Colimação Aberta, o valor da vazão calculada é um pouco distante do valor da vazão de referência e a porcentagem da incerteza da medição calculada começa em 17% para a vazão de 200 L.h^{-1} e chega até 22% quando a vazão de 800 L.h^{-1} .

No caso das medições colimadas com uma fenda de 1 cm, observa-se que os valores calculados da vazão estão próximos aos valores da vazão de referência. A porcentagem de erro nas vazões calculadas para esta geometria começam em 9% para a vazão de 200 L.h^{-1} e chegam até 23% para 800 L.h^{-1} .

Quando o ângulo sólido é mais aberto o registro do deslocamento da nuvem de radiotraçador fica comprometido, pois a região de visualização (região hachurada, ver Figura 3.12) do sistema duto/colimador/detector é muito aberta, ou seja, o volume sensível para registrar o movimento da nuvem de radiotraçador é muito grande. Quando se usa a Colimação com Fenda, esse volume sensível diminui e o deslocamento da nuvem de

radiotraçador é registrado com mais informações porque a região de visualização do sistema duto/colimador/detector é menos aberta, Figura 3.11. De forma resumida, ângulo sólido grande e distância pequena entre detectores tem como consequência uma grande incerteza na medição da vazão.

4.2 Vazão em função da distância

Como decidiu-se apresentar os resultados de ambos correlatores de forma conjunta se fez necessário apresentar a análise da potencialidade do filtro de Savitzky-Golay previamente. Os resultados das simulações com inclusão de ruído branco com 1% e 10% ao sinal original para avaliar a contribuição do filtro de Savitzky-Golay são apresentados na Figura 4.4. Vale destacar que esses resultados foram obtidos para a geometria de medição Caso-2. De forma similar os resultados obtidos para a geometria de medição Caso-1 são apresentados na tabela 4.1.

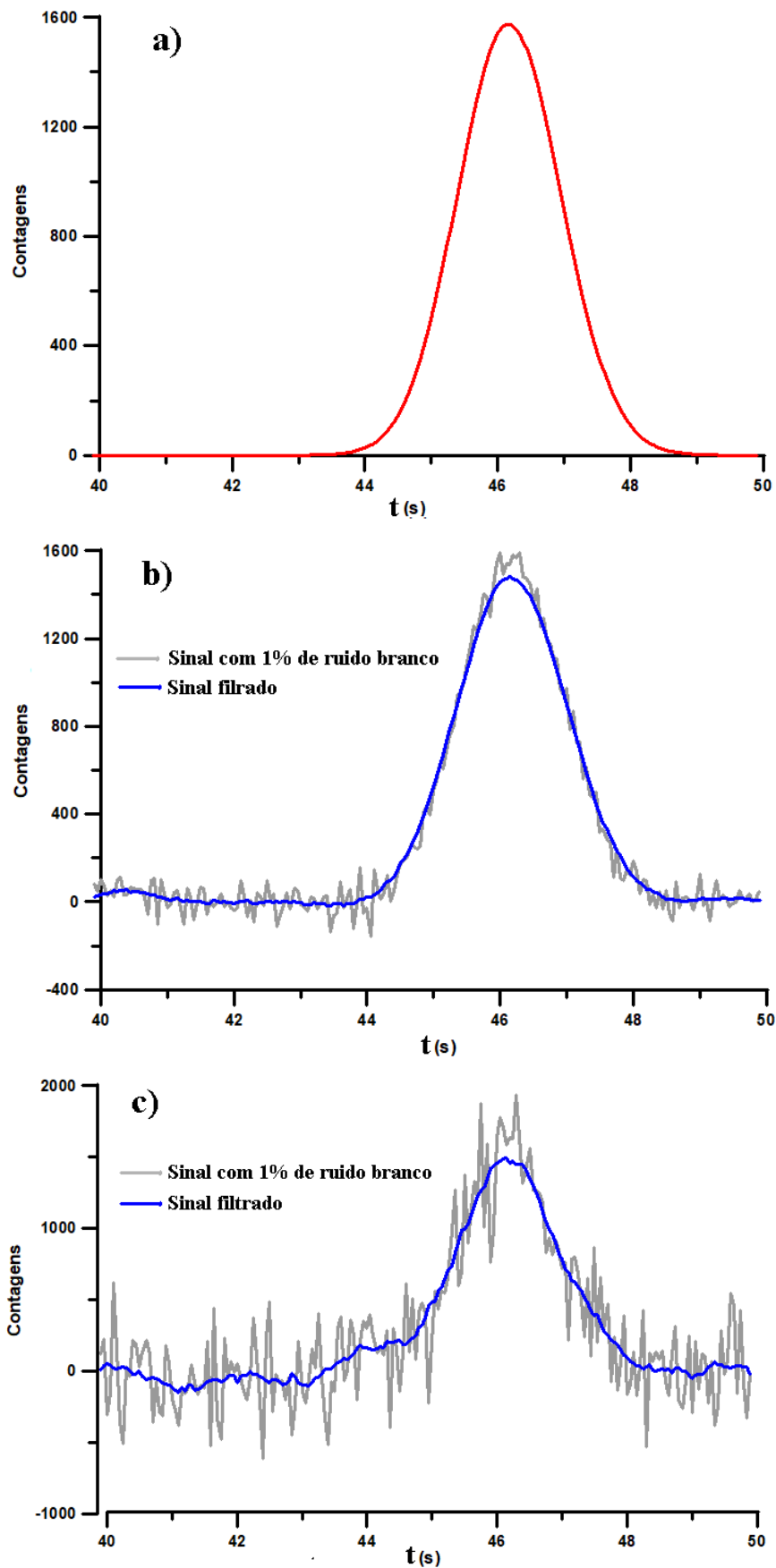


Figura 4.4: a) Estudo da ação do filtro de Savitzky-Golay no sinal registrado: (a) sinal puro; (b) sinal com 1% de ruído branco; (c) sinal com 10% de ruído branco

Tabela 4.1: **Resultados da potencialidade do filtro de Savitzky-Golay(SG) por meio do cálculo dos Momentos Estatísticos**

Grandeza	Sinal Puro	Filtro SG		Filtro SG	
		Sinal com Ruído Branco			
		1%	1%	10%	10%
Media(s)	46,19	46,18	46,18	46,15	46,20
Dispersão	0,61	0,74	0,70	1,30	0,74
Erro %	1,31	1,60	1,34	2,81	1,60
Assimetria	1,59	1,754	1,58	1,73	1,68

Analisando os dados da tabela 4.1 fica evidente que ao aplicar o filtro de Savitzky-Golay nos dados com o acréscimo do ruído branco a qualidade dos dados melhora e muito, por exemplo do ruído de 10%, sem o filtro o erro percentual da média é igual a 2,8% e o mesmo sinal quando filtrado apresenta o erro percentual de 1,6%. Esses dados mostram que o filtro de Savitzky-Golay aplicado aos sinais registrados nos detectores cintiladores contribui para a melhora na definição da curva dos dados que irão gerar a curva do coeficiente de “Cross-Correlation”. Esse resultado é reforçado quando analisa-se o coeficiente de assimetria presente no sinal puro, com o coeficiente de assimetria igual a 1,59, que representa uma curva com uma pequena cauda à direita da média, como esperado para a dispersão do ^{82}Br na água. O efeito do ruído branco é diretamente proporcional ao efeito de cauda. E o uso do filtro de Savitzky-Golay contribui para minimizar esse problema.

A vazão foi calculada usando ambos correlatores e seis valores de espaçamentos entre os detectores. Neste estudo, a vazão foi medida para os seguintes valores: (200, 600, 800)L.h⁻¹. Os resultados de todas as vazões são resumidas a continuação na tabela 4.2

Tabela 4.2: **Vazão em função da distância.**

L (m)	Correlator-1	Correlator-2	Correlator-1	Correlator-2	Correlator-1	Correlator-2
	(Q ± Δ Q) L.h ⁻¹					
	200	200	600	600	800	800
0,12	162,5 ± 21,0	167,0 ± 17,0	470,0 ± 114,7	479,0 ± 74,3	588,4 ± 157,8	600,3 ± 105,3
0,33	201,2 ± 11,8	194,4 ± 9,7	580,2 ± 21,1	559,3 ± 16,1	779,4 ± 16,0	753,8 ± 11,3
0,48	234,3 ± 3,8	224,6 ± 1,9	695,8 ± 78,6	669,4 ± 70,8	962,4 ± 109,4	930,3 ± 103,7
0,60	216,5 ± 7,1	209,3 ± 1,1	636,6 ± 48,3	611,6 ± 40,1	636,6 ± 48,3	611,6 ± 40,1
0,81	216,5 ± 5,7	210,7 ± 3,8	632,2 ± 26,8	619,9 ± 26,0	632,2 ± 26,8	619,9 ± 26,0
0,97	209,0 ± 3,2	209,0 ± 0,8	638,9 ± 28,1	636,4 ± 12,8	638,9 ± 28,1	636,4 ± 12,8

Aplicando o Teste de Grubbs ao conjunto de resultados do Correlator-2, foi possível determinar um valor da vazão global para cada vazão estudada. O conjunto de valores e suas incertezas neste caso são apresentados na tabela 4.3:

Tabela 4.3: Valores da Vazão Global para as referencias de:(200, 600, 800)L.h⁻¹

Vazão Global(L.h ⁻¹)		
200	600	800
(197,14 ± 7,57)	(588,27 ± 24,74)	(782,06 ± 44,24)

A continuação apresentam-se nas figuras 4.5 os resultados dos cálculos das vazões realizados com ambos correlatores respectivamente. Vale destacar que em todas as figuras os pontos pretos correspondem as vazões calculadas como o Correlator-1 e os pontos vermelhos aos calculados com o Correlator-2. As linhas pretas horizontais contínuas e tracejadas correspondem ao valor da vazão de referência e sua incerteza. As linhas azuis horizontais contínuas e tracejadas ao valor global estatístico determinado seguindo o método de Grubbs e suas incertezas.

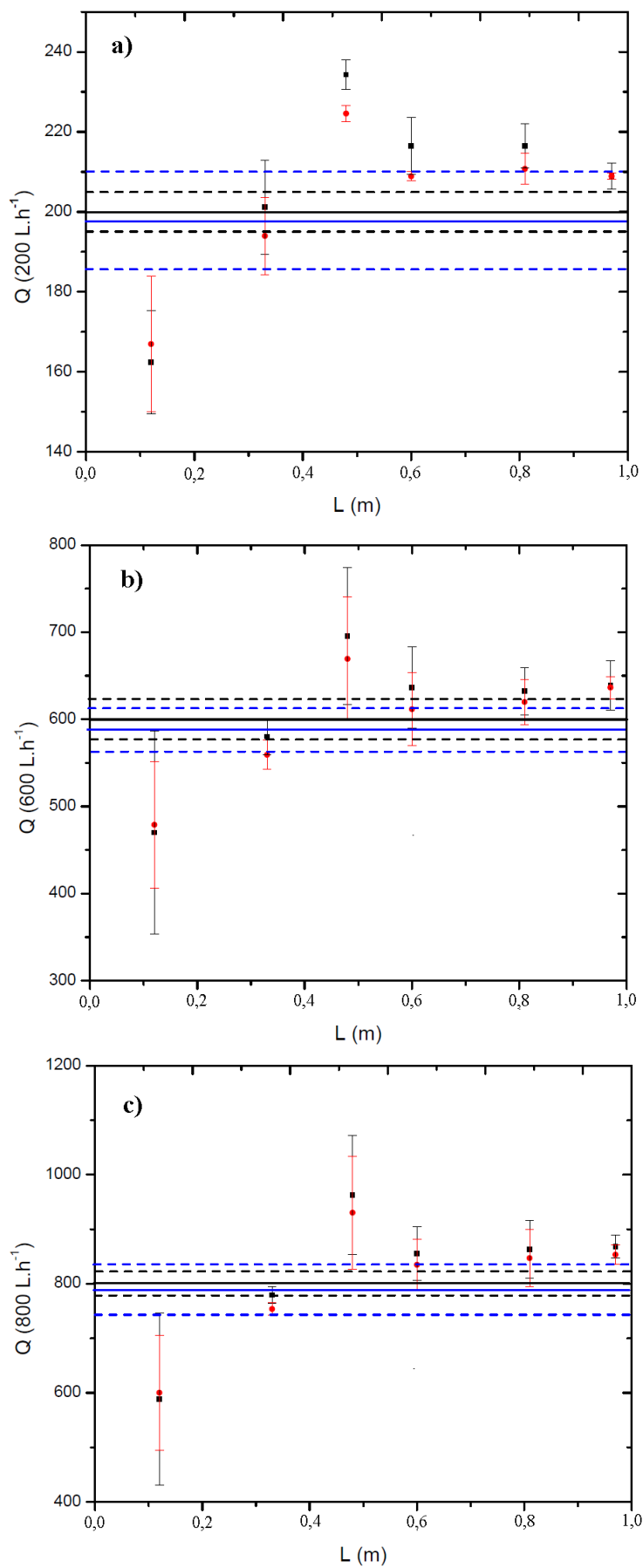


Figura 4.5: Vazão em função da posição para a vazão de referência de: (a) $200 L \cdot h^{-1}$; (b) $600 L \cdot h^{-1}$; (c) $800 L \cdot h^{-1}$

A partir desses resultados, pode-se destacar que quanto menor a separação entre os detectores, maior a incerteza da medição, tanto para o cálculo feito pelo Correlator-1 como pelo Correlator-2. Além disso, o valor medido está mais distante do valor nominal para essa condição. Esse resultado é semelhante para qualquer valor da vazão investigado.

A partir da separação de 50 cm entre os detectores, os valores medidos tendem a aproximar-se ao valor nominal para o Correlator-1 e o Correlator-2. O comportamento é o mesmo para qualquer valor da vazão investigado.

A diferença a destacar entre o uso dos dois correlatores para este conjunto de resultados é que todos os cálculos de vazão feitos com o Correlator-2, as incertezas são sempre menores do que aqueles feitos com o Correlator-1.

As grandes incertezas para medições à pequenas distâncias entre os detectores não são devidas apenas a um mau ajuste do ângulo sólido, mas também devido à baixa taxa de amostragem dos dados afeta a incerteza da medição.

4.3 Interferência da frequência de amostragem de dados na qualidade do resultado de vazão

Um terceiro parâmetro de investigação foi o estudo sobre a interferência da taxa de amostragem dos dados registrados pelos detectores no cálculo da medição da vazão, usando ambos Correlatores como descrito na metodologia seção 3.9.1. Os resultados destas simulações são apresentados nas tabelas 4.4 e 4.5. Vale destacar que a distância de separação entre os detectores para as simulações foi de 0,48 m.

Tabela 4.4: **Simulações usando ambos Correlatores para vazão de (175 L.h⁻¹)**

L 0,48 m	Correlator-1 (Q ±Δ Q) L.h ⁻¹	Correlator-2 (Q ±Δ Q) L.h ⁻¹	Frequência(Hz)
	181,37± 1,15	173,45± 0,98	200
	160,39± 1,10	172,37± 1,11	20
	138,24± 5,42	152,89 ± 4,05	2

Tabela 4.5: **Simulações usando ambos Correlatores para vazão de (720 L.h⁻¹)**

L	Correlator1	Correlator2	
0,48 m	(Q ±Δ Q) L.h ⁻¹		Frequência (Hz)
	627,83 ± 4,00	699,60 ± 4,46	200
	616,63 ± 4,01	685,41 ± 4,48	20

Por uma questão de visualização gráfica os resultados destas tabelas são plotados na figura 4.6

Na simulação, pode-se observar que, a partir da taxa de amostragem de 20Hz, os métodos de filtragem e interpolação funcionam melhor.

No caso da taxa de aquisição de 2Hz, a filtragem e interpolação não conseguem calcular bem o valor da vazão porque a estimativa no transiente de tempo através do cálculo da função de "Cross Correlation" é muito imprecisa, o que consequentemente resulta em uma medição errônea da vazão.

Os valores das vazões determinadas para as taxas de amostragem mais baixas estão mais distantes do valor de referência e suas incertezas são mais altas. Quando a velocidade do escoamento aumenta os valores das vazões calculados por ambos Correlatores estão distantes do valor de referência, apesar dos valores do Correlator-2 estarem mais próximos do valor da vazão de referência, suas incertezas são similares às do Correlator-1.

Considerando que os resultados da simulação mostraram que os métodos de filtragem e interpolação funcionam bem, que a partir de uma taxa de amostragem de 20 Hz, decidiu-se medir vazão para taxas de amostragem para valores muito acima (1 kHz) e abaixo desse valor (1 Hz), valores disponíveis pelo sistema de Detecção-1. Desta forma os resultados desse experimento são apresentados na tabela 4.6.

Tabela 4.6: **Valores da medição de vazão para uma taxa de amostragem de 10 Hz**

L	(Q ±Δ Q) L.h ⁻¹			
(m)	200	400	600	800
0,153	207,83 ± 25,74	561,33 ± 45,16	*	*
0,480	205,87 ± 5,21	428,30 ± 14,65	661,66 ± 56,27	1175,85 ± 246,09

* Os resultados da tabela 4.6 estão representados na figura 4.7, o símbolo na tabela indica que para esses valores de vazão de referência o sistema não tem resolução.

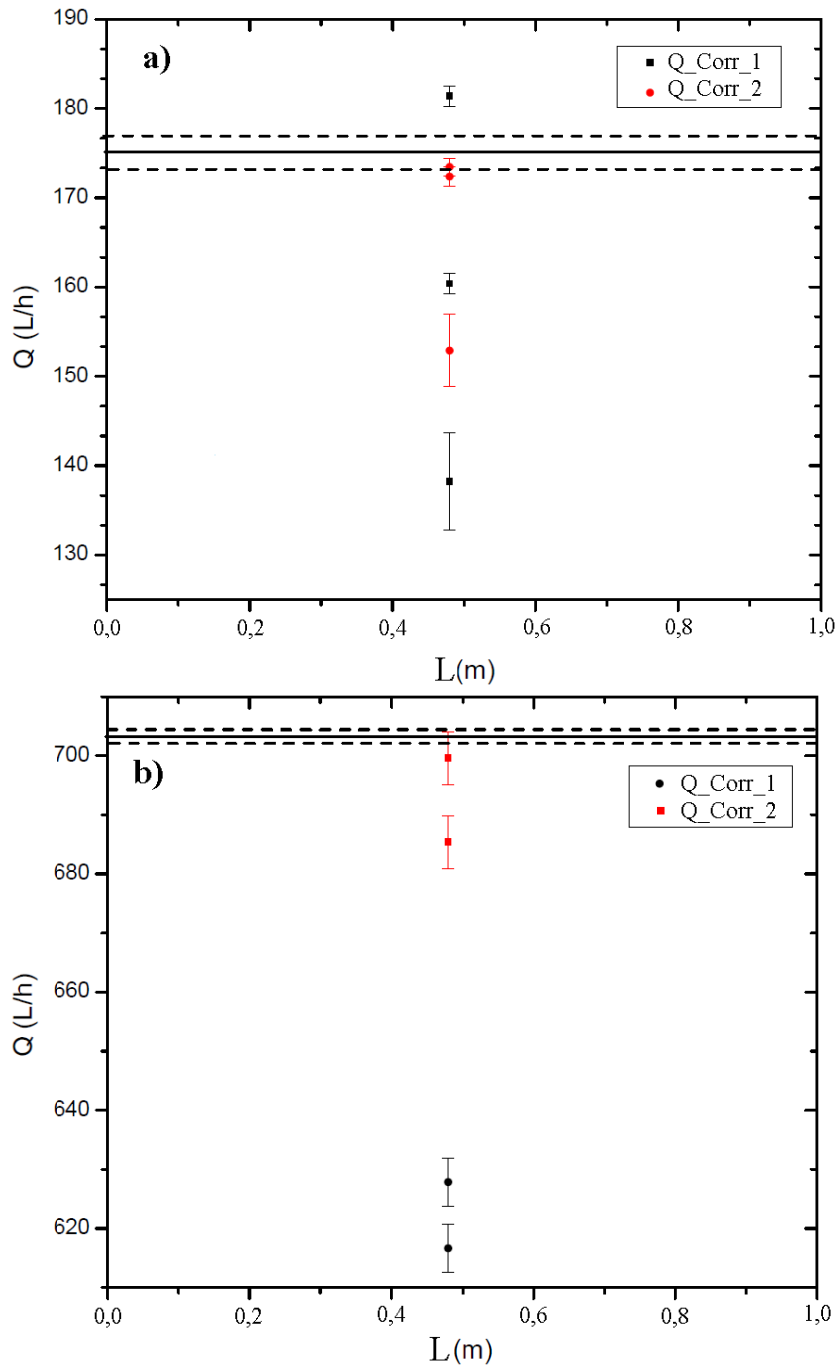


Figura 4.6: Resultados sobre a interferência da taxa de amostragem para vazão de: a) $175 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$; b) $720 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$.

A partir de $600 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ para $0,153 \text{ m}$ de separação entre os detectores, o sistema não tem resolução para medir vazão porque a taxa de amostragem é muito baixa para a velocidade com que esco a nuvem de radiotraçador. Este resultado demonstra a necessidade de programar muito bem todo o experimento de medição de vazão para um caso real. Esses resultados do aumento da incerteza não é uma característica deste método, também acontece o mesmo quando calcula-se o transiente de tempo usando o método de RTD [72].

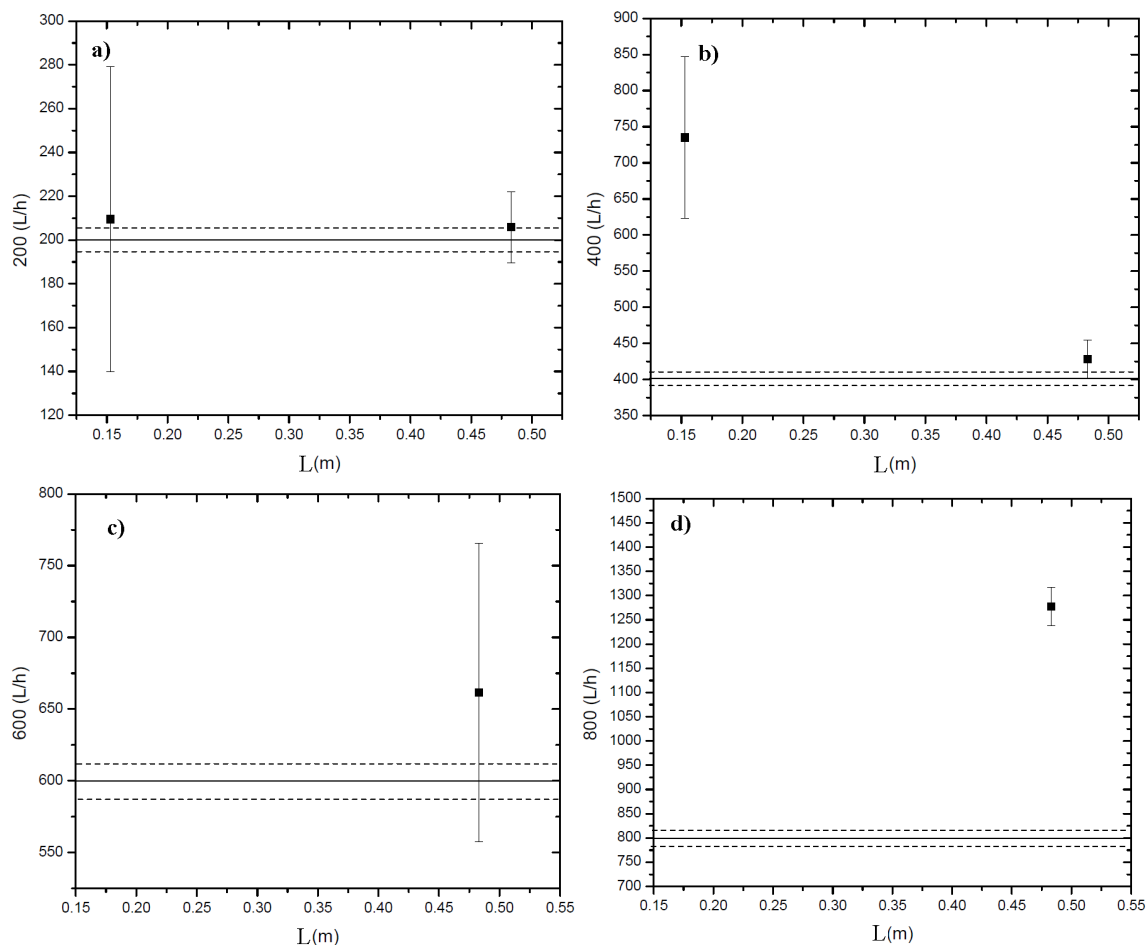


Figura 4.7: Valores de vazão e suas incertezas obtidos para uma taxa de amostragem de 10 Hz com a vazão de: a) 200 L.h⁻¹; b) 400 L.h⁻¹; c) 600 L.h⁻¹; d) 800 L.h⁻¹.

À distancia de 0,48 m, o sistema apresenta uma resposta um pouco melhor, no entanto as incertezas apresentam valores muito altos. A partir de valores de vazão 800 L.h⁻¹ o valor medido está muito distante do valor de referência.

Para as mesmas separações entre detectores de 0,153 m e 0,48 m calculou-se de novo a vazão com a taxa de amostragem de 1 kHz. En la tabela 4.7 se apresentam os valores dos resultados. Vale destacar que todas as vazões foram calculadas com o Correlator-2.

Tabela 4.7: Valores da medição de vazão para uma taxa de amostragem de 1 kHz

L m	(Q ± Δ Q) L.h ⁻¹			
	200	400	600	800
0,153	220,04 ± 13,05	487,92 ± 27,86	669,51 ± 23,75	951,31 ± 37,48
0,48	199,55 ± 0,76	413,16 ± 0,81	598,90 ± 5,67	791,85 ± 7,96

Na figura 4.8 estão apresentados os resultados plotados para cada vazão da tabela anterior.

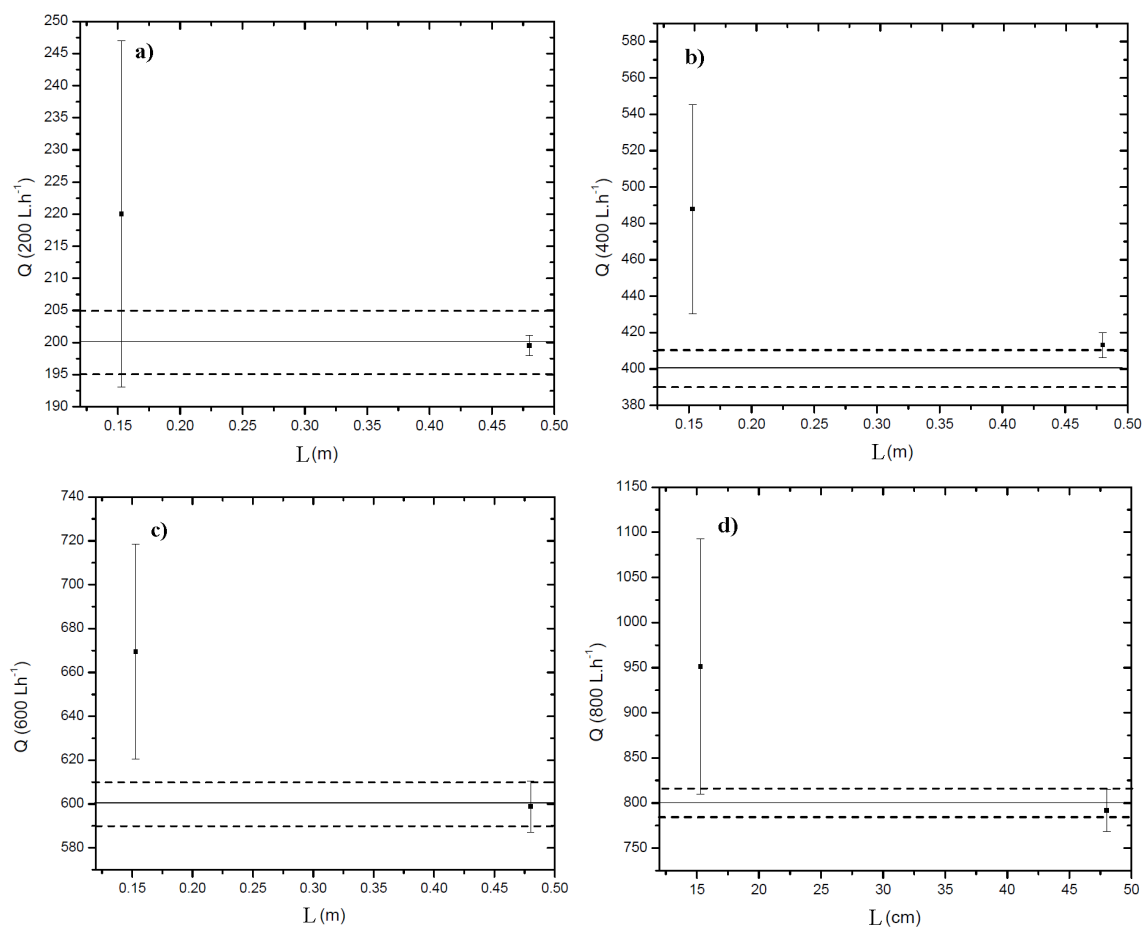


Figura 4.8: Valores de vazão e suas incertezas obtidos para uma taxa de amostragem de 1 kHz com a vazão de: a) 200 L.h⁻¹; b) 400 L.h⁻¹; c) 600 L.h⁻¹; d) 800 L.h⁻¹.

De acordo com os resultados, a incerteza para a distância entre os detectores de 0,153 m é ainda maior quando comparada com a obtida aos 0,48 m, provavelmente a taxa de amostragem é baixa para esta distância entre detectores.

Para a separação de 48 cm, vemos que a incerteza é muito menor que 1% para a vazão de 200 L.h⁻¹ e aumenta à medida que a vazão aumenta. No entanto, as incertezas para o resto das vazões estão muito próximas do 1%.

Com todos estes resultados, pode-se afirmar que a incerteza da medição depende da taxa de amostragem de dados, da velocidade de escoamento, da colimação dos detectores e da separação entre eles.

Todos esses parâmetros estão firmemente relacionados, um depende do outro. Ajustar cada um deles é um compromisso entre essas grandezas.

4.4 Medidor de Frações de Volume de Água

Os resultados obtidos pela seção de teste experimental e do modelo matemático desenvolvido com o código MCNPX são apresentados na figura 4.9. A função de Beer Lambert foi linearizada e re-escrita dessa forma $\ln(I/I_0) = \mu \cdot x$.

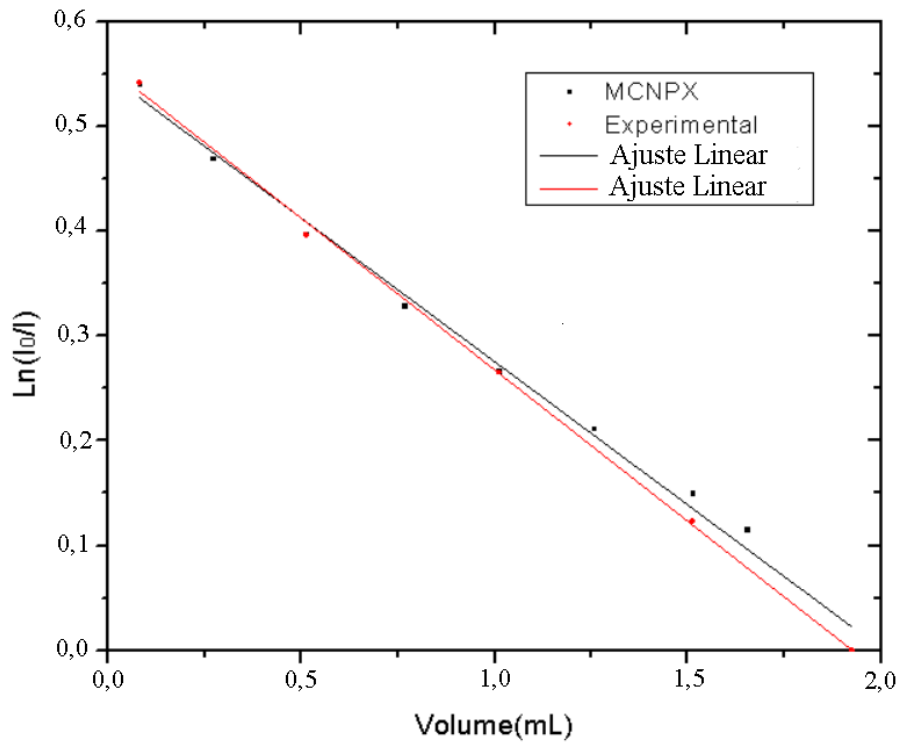


Figura 4.9: Contagens registradas por ambos dois sistemas em função do volume

As duas inclinações das curvas são levemente diferentes o quê pode ser devido ao espalhamento da radiação gama nas estruturas do sistema experimental, por exemplo, suportes de fixação do detector.

Os parâmetros obtidos para ambas as curvas são resumidos na tabela 4.8:

Tabela 4.8: **Parâmetros da regressão linear.**

	Experimental	MCNPX
r	0.99243	0.99833
(a ±Δ a)	(0,54935 ± 0,00986)	0,55691 ± 0,00714
(b ±Δ b)	(-0,27373 ± 0,00845)	(-0.28915 ± 0,00592)

Para essa geometria simples, a simulação se comporta de maneira semelhante à experimental. É possível estabelecer uma curva de calibração, a partir das contagens registradas obtendo-se assim o nível de água ou diretamente a fração de volume. Finalmente, após o cálculo do tempo de trânsito entre dois detectores mediante “Cross Correlation” obtém-se a vazão do fluido investigado.

4.5 Geometria de Medição de fração de Volume usando “Dual Modality”

Numa tentativa de aumentar a precisão no cálculo da fração de volume decidiu-se usar uma geometria chamada de dual modality, onde são considerados o feixe de transmissão e espalhamento. Desta forma, com base no material teórico da seção 2.5 para à determinação da fração volumétrica de água para o regime laminar, um goniômetro foi projetado para medir a fração de água para um sistema de raios gama de feixes múltiplos. A precisão do ângulo dos raios espalhados é de $\pm 1^\circ$. As bases de suporte foram projetadas para suportar dois detectores NaI (TI) de 1×1 ". O suporte da fonte é projetado para garantir a blindagem de chumbo da fonte de ^{137}Cs , que é um cilindro com diâmetro externo de $3,5\text{cm}$ e colimação de $0,5\text{cm}$. A posição dos dois detectores e a fonte radioativa de ^{137}Cs são ajustadas pelo goniômetro como indicado na Figura 4.10. O goniômetro foi projetado e construído em teflon. As bases de suporte da fonte e os dois detectores também são feitos de Teflon. Na Figura 4.11 está a foto do goniômetro real.

Provavelmente, a espessura lateral da blindagem de Pb foi insuficiente o que ocasionou a penetração dos raios gamma espalhados por todo o sistema de suportes do goniômetro impedindo a realização dos testes.

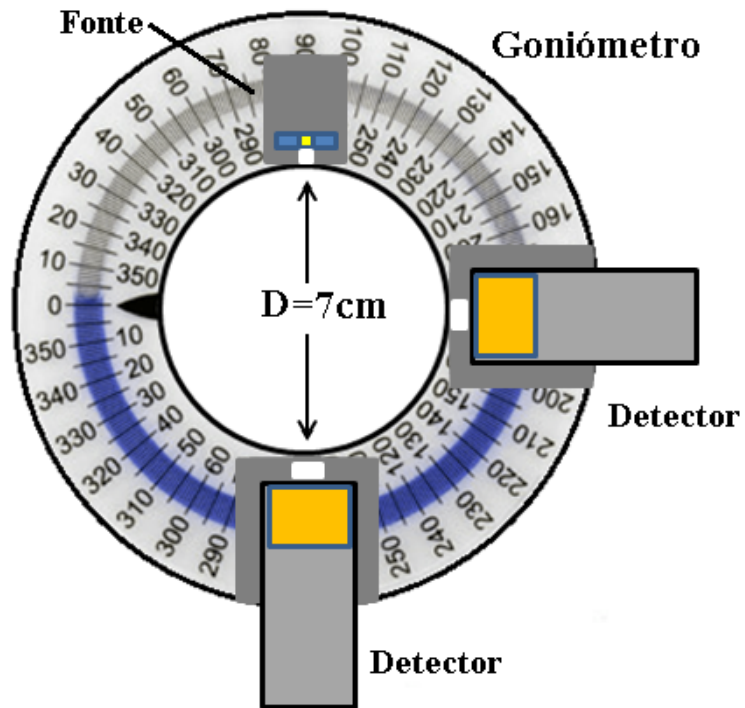


Figura 4.10: Goniómetro desenhado para medir o volume de água num cilindro acrílico

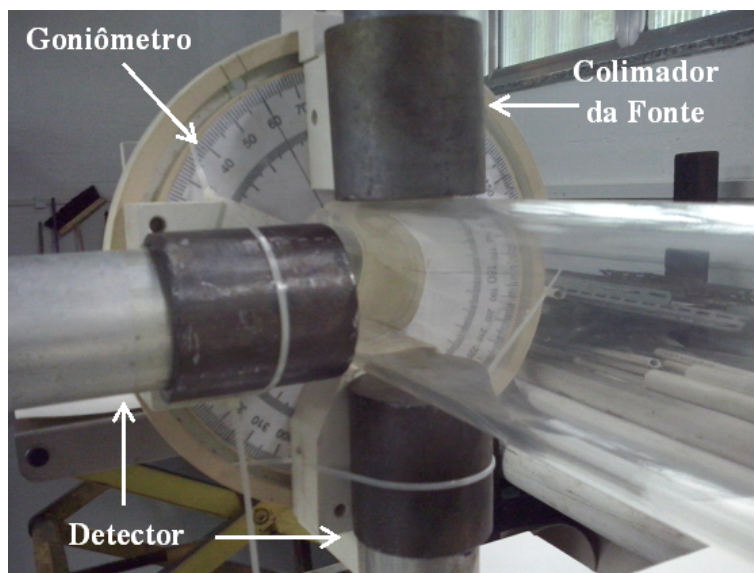


Figura 4.11: Foto do Goniómetro desenhado para medir o volume de água num cilindro acrílico

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

A partir dos análises de todos os resultados dos experimentos efetuados pode-se concluir:

Frequências de aquisição para valores acima de 20Hz são indicadas para vazões muito altas onde o numero de dados que descrevam a passagem da nuvem radioativa na região sensível do detector tende a decrescer comprometendo a precisão das medições.

1. O uso de filtro de Savitzky-Golay bem ajustado permite suavizar os sinais diminuindo o ruído sem modificar a forma do pulso original.
2. A aplicação das técnicas de interpolação e do filtro nos sinais registrados nos detectores permitiu modificar a taxa de amostragem diminuindo a incerteza na vazão para valores menores que 1% para 200 L.h⁻¹. No entanto, para taxas de amostragem muito baixas, não é possível alcançar o valor da vazão de forma correta.
3. À medida que a velocidade de escoamento da água aumenta, a taxa de amostragem de dados deve ser maior para garantir uma incerteza baixa. Quanto menor a distância entre os detectores, deve-se aumentar a taxa de amostragem.
4. A colimação dos detectores deve ser ajustada para que cada detector consiga registrar individualmente a nuvem de radiotraçador sem sobreposição dos seus ângulos sólidos. Um ângulo sólido muito pequeno precisa de uma atividade maior para poder ter uma boa relação sinal-ruído.
5. Os parâmetros: distância entre detectores, taxa de amostragem e colimação não são independentes para o cálculo vazão. Os três têm que ser ajustados conjuntamente para garantir uma boa medição.
6. Aplicar Savitzky-Golay e interpolação nos sinais antes do cálculo da função de “Cross Correlation” permitiu baixar as incertezas no cálculo da vazão, o que tornaria possível usar esta metodologia para aferir medidores de vazão convencionais.

Para trabalhos futuros têm-se:

1. Investigar em linhas de transporte com tubulações de diferente diâmetro.
2. Aplicar em sistemas de transporte bifásicos e outros fluidos.
3. Validar esta metodologia para tubos parcialmente preenchidos em regime dinâmico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BOFF, L. “A questão da água no contexto da globalização, tipo @ONLINE”. Disponível em: <<http://www.eco21.com.br/textos/textos.asp?ID=1251>>.
- [2] GOBBI, L. D. “Água: uso e problemas, tipo @ONLINE”. Disponível em: <<http://educacao.globo.com/geografia/assunto/geografia-fisica/agua-uso-e-problemas.html>>.
- [3] VICTORINO, C. *Planeta Água Morrendo de Sede*,. EDIPUCRS, 2007. ISBN: 978-85-7430-661-2.
- [4] CAMPO, S. “Falta de água será problema mundial para o século XXI, tipo @ONLINE”. 2014. Disponível em: <http://www.teinteresa.es/mundo/reservas-gestion-director-Water-Assement_0_1105690942.html>.
- [5] NOGUEIRA, D. “Brasil já registra um conflito por acesso à água a cada dois dias, tipo @ONLINE”. Disponível em: <<https://oglobo.globo.com/brasil/brasil-tem-um-conflito-por-agua-praticamente/cada-dois-dias-22509460>>.
- [6] DE EDUCAÇÃO AMBIENTAL, I. N. “Falta de água será problema para o século XXI, tipo @ONLINE”. 2015. Disponível em: <<http://ineam.com.br/falta-de-agua-sera-problema-mundial-para-o-seculo-xxi/>>.
- [7] PORTO, M. “Water Resources Policy in Brazil, tipo @ONLINE”. Disponível em: <http://www.kelman.com.br/pdf/Water_Resources_Policy_In_Brazil_2.pdf>.
- [8] MACHADO, C. J. S. “O mundo da administração pública das águas do estado do rio de janeiro segundo o olhar de um antropólogo, tipo @ONLINE”. 2006. Disponível em: <<http://www.scielo.br/scielo.php>>

script=sci_arttext&pid=S0104-71832006000100009/
cada-dois-dias-22509460>.

- [9] LEITE, R. “Tarifas da Cedae têm reajuste superior a 9%, tipo @ON-LINE”. 2017. Disponível em: <<https://oglobo.globo.com/rio/tarifas-da-cedae-tem-reajuste-superior-9-5494703>>.
- [10] CASSIOLATO, C., ALVES, E. “Medição de Vazão”, *Controle&Instrumentação*, , n. 138, nov. 2008.
- [11] UPP, E., NASA, P. L. *Fluid Flow Measurement: A Practical Guide to Accurate Flow Measurement*. 2 ed. 225 Wildwood Avenue Woburn, Gulf Professional Publishing, 2002.
- [12] IAEA. *Guidebook on Radioisotope Tracers in Industry*. IAEA 316, 1990.
- [13] BECK, M., PLASKOWSKI, A. *Cross Correlation Flowmeters: Their Design And Application*. 1 ed. Great Britain, Taylor-Francis, 1987.
- [14] KOMIYA, S. “Flow Velocity Measurement Using Cross Correlation Techniques”. In: *Bulletin National Research Lab of Metrology*, Series 12, pp. 64–72, 1986.
- [15] E M. S. BECK, S. A. A. “Cross-Correlation Techniques Applied 10 Pulsating Flow Measurement”, *Measurement and Control*, v. 3, pp. 112 – 109, 1970.
- [16] COULTHARD, J. “Ultrasonic cross-correlation flowmeters”, *Ultrasonics*, v. 11, n. 2, pp. 83–88, 1973.
- [17] ONG, K., BECK, M. “Slurry flow velocity, concentration and particle size measurement using flow noise and correlation techniques”, *Measurement and Control*, v. 8, n. 11, pp. 453–463, 1975.
- [18] S. T. OLSZOWSK, J. C. “Measurement of dispersed two-phase gas-liquid flow by cross correlation of modulated ultrasonic signals”, *Multiphase Flow*, v. 2, pp. 537 – 548.
- [19] H. BAZERGHI, K. S. “Estimation of reduction of errors in flow measurements which use cross correlation techniques”, *Progress in Nuclear Energy*, v. 1, pp. 629 – 648.
- [20] E M. ALQUIER, B. L. G. “Analysis of a horizontal solid-liquid pipe flow by a cross correlation method”, *International Journal of Multiphase Flow*, v. 4, pp. 511–521.

- [21] JORDAN, J. “A correlation interface circuit for microprocessor systems”, *Microelectron Journal*, v. 19, n. 5, pp. 423 – 423.
- [22] GODFREY, K. “Correlation Methods”, *Automatica*, v. 16, n. 5, pp. 427 – 434.
- [23] BECK, M. “Correlation in instruments: cross correlation flowmeters”, *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, v. 14, pp. 7 – 19.
- [24] E A. G. BAKER, G. D. L. “Errors in cross correlation peak location”, *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, v. 104, pp. 194 – 199, 1982.
- [25] IANNELLO, J. “Time Delay Estimation Via Cross-Correlation in the Presence of Large Estimation Errors”, *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, v. 51, n. 4, pp. 998 – 1003, 1982.
- [26] COULTHARD, J. “Cross-Correlation Flow Measurement-A History and the State of the Art”, *Measurement and Control*, v. 16, n. 6, pp. 214 – 218.
- [27] KOPPERMANN, C. *A signal model for cross-correlation flowmeters to analyse systematic measurement errors*. Relatório técnico, Institut für Mess und Regelungstechnik, Universität Karlsruhe,, POB 6380, 7500, Karlsruhe, FRG, 1984.
- [28] M. AZARIA, D. H. “Time Delay Estimation by Generalized Cross Correlation Methods”, *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, v. 32, n. 2, pp. 280 – 285, 1982.
- [29] S.A. JACOBSON, P. D. *A new method for the demodulation of ultrasonic signals for cross correlation flowmeters*. Relatório técnico, Ultrasonic Process Control Division, 221 Crescent Street Waltham, MA 02254, USA, 1985.
- [30] E F.A. ALI, M. H. “A fast algorithm for the on-line estimation of polarity correlation using binary patterns”, *Transducer Instruments M. C*, v. 10, n. 5, pp. 258 – 264.
- [31] HARBA, M. “A generalised algorithm for polarity correlation estimation using binary patterns”, *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, v. 14, n. 4, pp. 212–222, 1992.
- [32] J. COULTHARD, Y. Y. *Vortex wake transit time measurements for flow metering*. Relatório Técnico TS1 3BA, University of Teesside, School of Science and Technology, UK, 1993.
- [33] J. CHEN, J. TORNBERG, J. K. E. M. K. “Automatic industrial cross-correlator for flow measurement”, *ISA Transactions*, v. 33, pp. 171 – 179.

- [34] K JAMBUNATHAN, X Y JU, B. N. D., ASHFORTH-FROST, S. “An improved cross correlation technique for particle image velocimetry”, *Measurement Science and Technology*, v. 6, pp. 507 – 514, 1995.
- [35] E M. S. BECK, W. Q. Y. “An intelligent cross correlator for pipeline flow velocity measurement”, *Flow Measurement Instruments*, v. 8, n. 2, pp. 77 – 84.
- [36] SUN, X., XU, J., OTHERS. “A prototype of on-line digital flow rate meter based on cross-correlation principle”, 1997.
- [37] WORCH, A. “A clamp-on ultrasonic cross correlation flow meter for one-phase flow”, *Measurement Science Technology*, v. 9, pp. 622 – 630.
- [38] X. LAI, H. T. “Interpolation Methods for Time-Delay Estimation Using Cross-Correlation Method for Blood Velocity Measurement”, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, v. 46, n. 2, pp. 277 – 289, 1999.
- [39] GIROUD, J., PALMER, B., DOVE, J. “Calculation of flow velocity in pipes as a function of flow rate”, *Geosynthetics International*, v. 7, n. 4-6, pp. 583–600, 2000.
- [40] GODLEY, A. “Flow measurement in partially filled closed conduits”, *Flow Measurement and Instrumentation*, v. 3, n. 11, pp. 197–201, 2002.
- [41] D. RUAN, D. ROVERSO, P. F. “Integrating Cross-Correlation Techniques and Neural Networks for Feedwater Flow Measurement”, *Progress in Nuclear Energy*, v. 43, n. 1 - 4, pp. 267 – 274.
- [42] S. TAKASHIMA, H. ASANUMA, H. N. “A water flowmeter using dual fiber Bragg grating sensors and cross-correlation technique”, *Sensors and Actuators*, v. 116, n. A, pp. 66 – 74, 2004.
- [43] M. ARATTANO, L. M. “Measurements of debris flow velocity through cross-correlation of instrumentation data”, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 5, pp. 137 – 142, 2005.
- [44] P. D. LYSKA, D. M. JENKINS, D. E. C. W. L. B. “Analytical model of an ultrasonic cross-correlation flow meter, part 2: Application”, *Flow Measurement and Instrumentation*, v. 19, pp. 41 – 46.
- [45] S.H JUNG, J.S. KIM, J. K. T. K. “Flow-rate measurements of a dual-phase pipe flow by cross-correlation technique of transmitted radiation signals”, *Applied Radiation and Isotopes*, v. 67, pp. 1254 – 1258.

- [46] C. W. FERNANDES, M. D. BELLAR, M. M. W. “Cross-Correlation-Based Optical Flowmeter”, *IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT*, v. 59, n. 4, pp. 41 – 46, 2010.
- [47] N. SHAFIZA, F. G. “Techniques for Optimization in Time Delay Estimation from Cross Correlation Function”, *International Journal of Engineering and Technology IJET-IJENS*, v. 10, n. 2, pp. 49 – 54, 2010.
- [48] GAJEWSKI, J. “Accuracy of cross correlation velocity measurements in two-phase gas–solid flows”, *Flow Measurement and Instrumentation*, v. 30, pp. 133 – 137.
- [49] R. HANUS, L. PETRYKA, M. Z. “Velocity measurement of the liquid–solid flow in a vertical pipeline using gamma-ray absorption and weighted cross-correlation”, *Flow Measurement and Instrumentation*, v. 40, pp. 58 – 63.
- [50] B. SHI, J. WEI, M. P. “A modified cross-correlation algorithm for PIV image processing of particle-fluid two-phase flow”, *Flow Measurement and Instrumentation*, v. 45, pp. 105 – 117.
- [51] JIANG Y, LI B, C. J. “Analysis of the Velocity Distribution in Partially-Filled Circular Pipe Employing the Principle of Maximum Entropy”, *PLOS one*, v. 3, n. 11, 2016.
- [52] A.SAOUD, V.MOSOROV, K. “Measurement of velocity of gas/solid swirl flow using Electrical Capacitance Tomography and cross correlation technique”, *Flow Measurement and Instrumentation*, v. 53, pp. 133 – 140.
- [53] SOUTH FLORIDA WATER MANAGEMENT DISTRICT WATER USE REGULATION BUREAU 2014, S. *Water Use Flow Monitoring and Calibration Guidelines*. Technical manual,, South Florida Water Management District, SFWMD, 3301 Gun Club Road West Palm Beach, FL 33406-3089, 2014.
- [54] COELHO, P. “Número de Reynolds”. Disponível em: <<https://www.engquimicasantosp.com.br/2013/10/numero-de-reynolds.html>>.
- [55] BAKER, R. *Flow Measurement Handbook*. 2 ed. 32 Avenue of the Americas, New York, Cambridge University Press, 2016.
- [56] DÉLMEÉ, G. J. *Manual de Medição de Vazão*. 3 ed. São Paulo, Brasil, Editora Blucher, 2003.
- [57] FRENZEL, F., GROTHEY, H., HABERSETZER, C., et al. *Industrial Flow Measurementv Basics and Practice*. ABB Automation Products GmbH, 2011.

- [58] PUERTAS, E. J. A. *Medidas de Vazão Usando Espalhamento da Radiação Gama e a Técnica de “Cross Correlation”*. Ms.C. dissertação, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2014.
- [59] LEE, J. “Tracer measurements on a large diameter pipe”, *Chemical Engineering Science*, v. 12, n. 3, pp. 191–197, 1960.
- [60] HAMMING, R. W. *Digital filters*. Dover civil and mechanical engineering. Dover Publications, 1997.
- [61] ORFANIDIS, S. *Introduction to Signal Processing*. 1995. ISBN: 0132091720,9780132091725.
- [62] SUHLING, M., ARIGOVINDAN, M., HUNZIKER, P., et al. “Multiresolution moment filters: Theory and applications”, *IEEE Transactions on Image Processing*, v. 13, n. 4, pp. 484–495, 2004.
- [63] SAVITZKY, A., GOLAY, M. J. “Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures.” *Analytical chemistry*, v. 36, n. 8, pp. 1627–1639, 1964.
- [64] GORRY, P. A. “General least-squares smoothing and differentiation by the convolution (Savitzky-Golay) method”, *Analytical Chemistry*, v. 62, n. 6, pp. 570–573, 1990.
- [65] SEMATECH, N. “Detection of Outliers, tipo @ONLINE”. Disponível em: <https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/eda/section3/eda35h.htm>.
- [66] GRUBBS, FRANK, J. V. N. P. Y. P. “Procedures for Detecting Outlying Observations in Samples”, .
- [67] TEAM, X.-. M. C. “MCNP. A General Monte Carlo N-Particle Transport Code”. Los Alamos National Laboratory, www.nucleonica.net/wiki/images/8/89/mcnpvoli.pdf, 2003.
- [68] LUDLUM MEASUREMENTS, I. *Ludlum Model 4612, 12-Channel Counter (SCA)*. Technical manual,, Ludlum Measurements, Inc, 501 OAK Street Sweetwater, 2014.
- [69] MAFRA, O. *Técnicas e Medidas Nucleares*. São Paulo, Brasil, Blucher, 1973.
- [70] GONÇALVES, E. *Desenvolvimento de Metodología para Medidas de Atividade Total de Amostras de Óleo Marcado com Au-198*. Ms.C. dissertação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2013.

- [71] SALGADO, C. M., BRANDÃO, L. “Validation of a NaI(Tl) detector’s model with MCNP-X code”, *Progress in Nuclear Energy*, v. 59, pp. 19 – 25, 2012.
- [72] BRANDAO, L. E. “Certification of Flow Measurement Methods and Calibration of Flowmeters in Oil and Gas Industry Using Radioactive Tracers”. In: *2017 International Nuclear Atlantic Conference - INAC 2017*, Belo Horizonte, MG, Brazil, out. 2017.